CONSTRUCCIÓN DE MÓDULO CONVERTIDOR CC-CC ELEVADOR, PARA PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DEL PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA

SEBASTIAN CARDONA HERRERA

STEVEN OSPINA HURTADO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

PEREIRA

2015

CONSTRUCCIÓN DE MÓDULO CONVERTIDOR CC-CC ELEVADOR, PARA PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO DEL PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA

SEBASTIAN CARDONA HERRRERA

STEVEN OSPINA HURTADO

Trabajo de grado para optar al título Ingeniero en Mecatrónica

Director: Ingeniero electricista Henry William Peñuela

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

PEREIRA

2015

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios, por fortalecer nuestro espíritu y nuestro camino. Gracias a nuestro director el ingeniero Henry W. Peñuela por todo el apoyo, por guiarnos a realizar este proyecto, por dedicarnos su tiempo y su conocimiento.

A nuestros padres, que siempre están ahí apoyándonos en nuestra carrera y futuro como profesionales.

Por último agradecemos a la Universidad Tecnológica de Pereira y al semillero de investigación Mecabot que nos brindó herramientas para desarrollar el proyecto.

RESUMEN

Durante el desarrollo de la construcción del módulo convertidor CC-CC elevador, se proyectaron los elementos que conformarán el diseño y construcción del mismo, entre estos se encuentran:

Modelo matemático-físico: Esta sección del proyecto incluye el modelo matemático basado en las leyes de *Kirchhoff*, análisis del sistema en el software *MATLAB* del sistema en lazo abierto.

Prototipo en lazo abierto: Implementación del sistema en lazo abierto con las características y especificaciones diseñadas. Análisis en el software *OrCAD capture*, con las descripciones de los componentes que conforman el convertidor.

Diseño de controlador: Hace referencia a las funciones de transferencia que se obtienen del convertidor y el controlador aplicado a este. El análisis del sistema en lazo cerrado con el controlador, desarrollado en diagramas de bloques en *Simulink* del software *MATLAB*.

Construcción del sistema: Culminación del proyecto, ensamblado en baquela y acoplado con la estructura del módulo.

Se simularon los circuitos en el software *"OrCAD capture"*, en este programa se montó los circuitos de los convertidores CC-CC elevadores, se obtuvieron gráficas del comportamiento del sistema para su análisis, y los análisis para el controlador se realizaron mediante *MATLAB*.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 10

1. CONVERTIDORES CC-CC 12

1.1 CONVERTIDOR REDUCTOR 12

1.2 CONVERTIDOR ELEVADOR 13

1.3 CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR 15

1.4 MODO DE FASE CORRECTA DE PWM EN ARDUINO 16

2. MODELADO Y DISEÑO DEL CONVERTIDOR CC-CC BOOST 18

2.1 MODELO DEL CONVERTIDOR BOOST 18

2.1.1 Parametrizar. 19

2.1.2 Promediar. 19

2.1.3 Linealización. 20

2.1.4 Espacio de estados. 21

2.2 DISEÑO DEL CONVERTIDOR CC-CC BOOST 21

2.4 ANÁLISIS DE LOS INDUCTORES 28

2.4.1 Inductor 1. 28

2.4.2 Inductor 2. 29

2.5 PROTOTIPO DEL CONVERTIDOR ELEVADOR. 30

3. DISEÑO DE CONTROLADOR 33

3.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA 33

3.2 ECUACIÓN EN DIFERENCIAS DEL CONTROLADOR. 34

3.3 CONTROLADOR 35

3.4 PROTOTIPO DEL CONVERTIDOR ELEVADOR EN LAZO CERRADO. 37

4. CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS 40

4.1 CONSTRUCCIÓN 40

4.1.1 Estructura del módulo. 40

4.1.2 Circuito impreso 43

4.1.3 Fuente de alimentación del módulo. 45

4.1.4 Arduino utilizado. 45

4.2 PRESUPUESTO 47
4.2.1 Costo de materiales. 47
4.2.2 Costo de trabajo 49
4.2.3 Costo total 49
4.3 RESULTADOS 49

CONCLUSIONES 52
RECOMENDACIONES 54
BIBLIOGRAFÍA 55
ANEXOS 57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del convertidor reductor. 13
Figura 2. Esquema del convertidor elevador. 14
Figura 3. Esquema del convertidor reductor-elevador. 15
Figura 4. Señal del PWM en arduino. 17
Figura 5. Diagrama en Simulink, convertidor elevador. 18
Figura 6. Esquema convertidor elevador, con interruptor cerrado. 18
Figura 7. Esquema convertidor elevador, con interruptor abierto. 19
Figura 8. Esquema convertidor elevador de 24 volts, software OrCAD. 24
Figura 9. Gráfica convertidor elevador de 24 volts, software OrCAD. 24
Figura 10. Esquema convertidor elevador de 18 volts, software OrCAD. 25
Figura 11. Gráfica del convertidor elevador de 18 volts, software OrCAD. 25
Figura 12. Gráficas de voltaje de salida y corriente de inductor, Simulink. 26
Figura 13. Motor de 18 volts. 27
Figura 14. Motor de 24 volts. 27
Figura 15. Gráfica de corriente sobre el inductor 1. 29
Figura 16. Gráfica de corriente sobre el inductor 2. 29
Figura 17. Gráfica en lazo abierto. 30
Figura 18. Arduino Mega 2560. 31
Figura 19. Sistema en lazo abierto del convertidor elevador. 31
Figura 20. Convertidor elevador en funcionamiento con el osciloscopio. 32
Figura 21. Ventana de configuración del controlador. 35
Figura 22. Diagrama de bloques, lazo cerrado en tiempo discreto. 36
Figura 23. Gráfica de la señal de salida con el controlador PI sintonizado. 36
Figura 24. Divisor de tensión, sensor del convertidor elevador. 37
Figura 25. Sistema en protoboard, lazo cerrado con motor de 18 volts. 38
Figura 26. Arduino pro-mini atmega328. 38
Figura 27. Prototipo convertidor lazo cerrado, motor 24 volts. 39
Figura 28. Caja para construcción del módulo. 40
Figura 29. Tapa del módulo. 41
Figura 30. Tapa perforada con las borneras ensambladas. 41
Figura 31. Diseño del adhesivo. 42
Figura 32. Módulo convertidor CC-CC elevador. 42
Figura 33. Multímetro digital para módulo de instrumentación. 43
Figura 34. Placa del módulo convertidor. 44
Figura 35. Circuito completo del módulo. 44
Figura 36. Fuente de alimentación. 45
Figura 37. Tarjeta RS-232. 46
Figura 38. Adaptador USB a serial RS-232. 46
Figura 39. Conexión para quemar el arduino. 47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de diseño. 22
Tabla 2. Especificaciones de diseño 23
Tabla 3. Resultados de parámetros de diseño 23
Tabla 4. Características básicas de los motores. 26
Tabla 5. Características de los inductores a implementar. 28
Tabla 6. Características de la fuente. 45
Tabla 7. Costos de materiales. 47
Tabla 8. Costos de trabajo. 49
Tabla 9. Presupuesto final. 49
Tabla 10. Muestras de la variación del error. 50

ANEXOS

ANEXO A 57
ANEXO B 59
ANEXO C 61
ANEXO D 63
ANEXO E 65

INTRODUCCIÓN

La industria moderna se mueve gracias a la energía eléctrica. Los sistemas con circuitos de electrónica de potencia convierten la energía eléctrica de un tipo a otro utilizando dispositivos electrónicos.

En la electrónica de potencia se combinan la potencia, la electrónica y el control. El control tiene que ver con características de estado estable y dinámicas de sistemas de lazo cerrado. La potencia tiene que ver con el equipo estático y rotatorio para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. La electrónica tiene que ver con los dispositivos y circuitos de estado sólido para el procesamiento de señales que cumplan con los objetivos deseados en el control. Entonces electrónica de potencia, se puede definir de forma muy básica como las aplicaciones de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica.

Los convertidores CC-CC poseen numerosas configuraciones, entre estas se encuentran: convertidor elevador (boost), convertidor reductor (buck), convertidor reductor-elevador (buck-boost). En estos circuitos uno de los factores el cual es vital para su funcionamiento es la frecuencia de conmutación, ya que de esta depende la eficiencia del convertidor. Con el avance de la tecnología, especialmente en el área de la electrónica, se han podido desarrollar cada día mejores elementos de conmutación (transistores) a un menor precio, lo cual ha hecho posible su implementación masiva en numerosas aplicaciones.

Esta área de electrónica de potencia, ha presentado tener un gran valor en la industria, debido a que se necesitan demasiados sistemas que procesen la energía eléctrica de manera adecuada. Los conocimientos que se requieren para esta área deben estar complementados tanto en teoría como en la práctica, para una mejor comprensión de los conceptos.

A nivel global hay empresas que ofrecen dentro de su portafolio comercial convertidores de diversas especificaciones, para numerosos sectores desde el sector aeronáutico hasta el educativo; en este cabe destacar las siguientes: Murata Power Solutions, Infineion, la primera empresa es norteamericana y la segunda alemana.

En Colombia hay dos compañías, Emerson electric de Colombia y Siemens ambas localizadas en la ciudad de Bogotá, la primera de origen Norteamericano y la segunda de Alemán. De este tipo de productos se

encuentra el SITOP PSU400M de Siemens, el cual es un convertidor CC-CC reductor, con entrada que puede oscilar entre los 200 y 900 Volts y salida de 24 Volts, frecuentemente usado para accionamientos y sistemas de baterías.

En el laboratorio del programa ingeniería mecatrónica, se encuentran una serie de entrenadores que abarcan distintas áreas, aun así hace falta implementos para que la asignatura de electrónica industrial, que estudia la electrónica de potencia, se desarrolle de una manera complementaria y equilibrada, que permita a los estudiantes de séptimo semestre del programa ingeniería mecatrónica, afianzar el aprendizaje en el aula de clase por medio del proceso de experimentación y así capturar el interés de los estudiantes, por una rama de la ingeniería que es tan vital en la industria.

Para dar solución a una de las falencias, se propone como objetivo general calcular y construir un módulo convertidor CC-CC elevador, para la formación de los estudiantes de ingeniería mecatrónica de séptimo semestre de la universidad tecnológica de Pereira. Este módulo ayudará a establecer las bases de los convertidores CC-CC, guiándolos en el proceso de análisis e investigación del circuito y complementando con el área de sistemas de control, permitiendo acoplar las asignaturas cursadas en el transcurso de la carrera.

1. CONVERTIDORES CC-CC

Los convertidores CC-CC convierten una tensión continua en otro nivel de tensión continua, donde generalmente se puede proporcionar una salida regulada. Los convertidores CC se podrían considerar con la semejanza de los transformadores CA, ya que se usan para subir y bajar el voltaje de la fuente. [12]

Estos convertidores tienen variadas aplicaciones tales como: fuentes de poder en computadoras, sistemas de potencia en vehículos eléctricos, etc. Las configuraciones más esenciales son: reductor (Buck), elevador (Boost), Reductor-elevador (Buck-Boost).

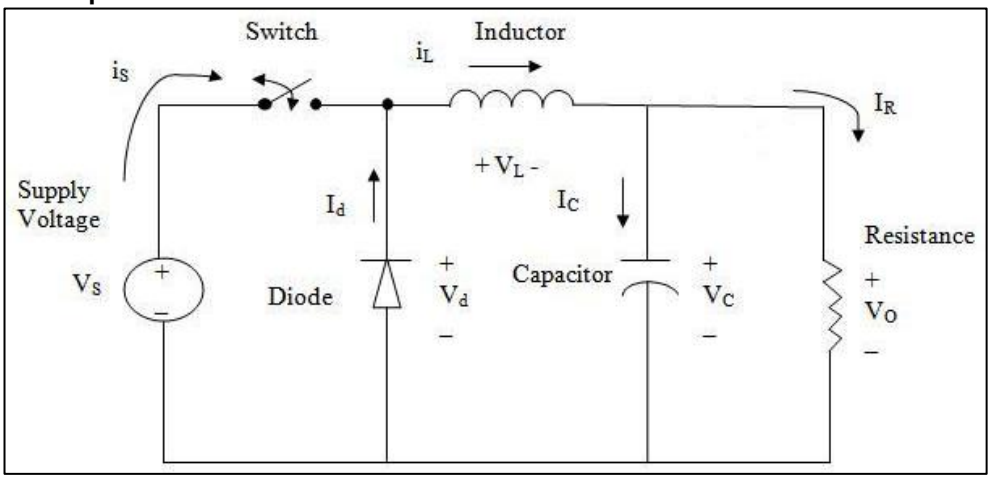
Las configuraciones mencionadas anteriormente llevan 4 elementos básicos: inductor (L), capacitor (C), diodo y un interruptor controlado; así los 4 componentes mencionados anteriormente, permitirán dependiendo de su ubicación, características distintas en el circuito. [9]

1.1 CONVERTIDOR REDUCTOR

Un convertidor reductor, es un tipo de circuito el cual produce un voltaje medio, de salida inferior al voltaje de entrada. Es usada para fuentes de energía reguladas y control de velocidad de motores de corriente continua.

El funcionamiento del circuito se puede dividir en dos estados, El modo 1 comienza cuando el switch se cierra. La corriente de entrada pasa por el inductor de filtro, el capacitor de filtro y el resistor de carga. El modo 2 comienza cuando se apaga el switch. El diodo conduce la energía en el inductor y la corriente del inductor sigue pasando por el capacitor, la carga y el diodo, así continuamente. [7]

Figura 1. Esquema del convertidor reductor.



Fuente: Power electronics. [Esquema]. 3 noviembre de 2014. Disponible en la web: <http://www.powere.dynamictopway.com/dc3.htm>

Las ecuaciones principales del convertidor reductor son:

$$D = \frac{V_o}{V_s} \qquad Ecuación\ 1.1$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \qquad Ecuación\ 1.2$$

$$L = factor.L_{min} \qquad Ecuación\ 1.3$$

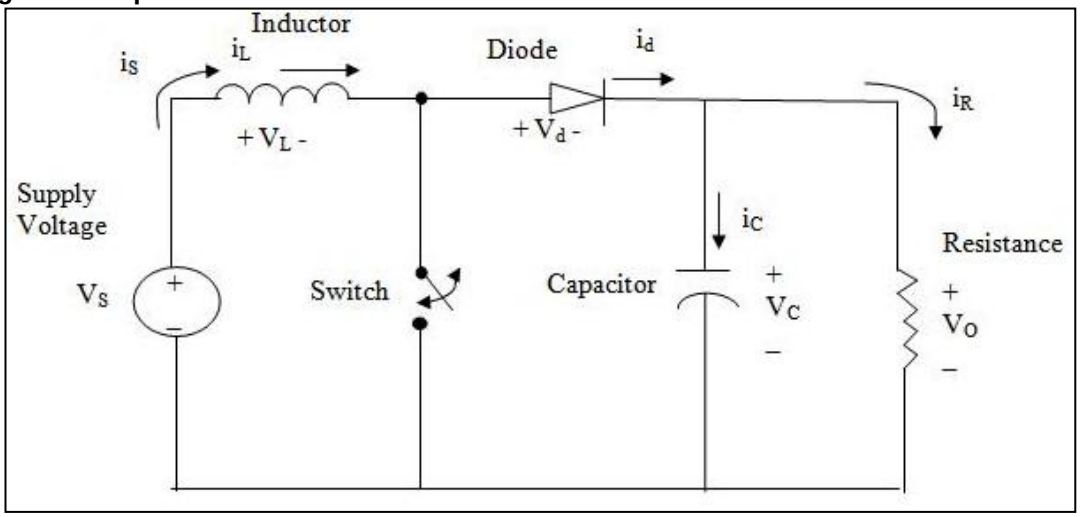
$$I_{\substack{Lmax \\ Lmin}} = \left(\frac{1}{R} \pm \frac{(1-D)}{2Lf}\right)V_o \qquad Ecuación\ 1.4$$

$$C = \frac{1-D}{8Lf^2\frac{\Delta V_o}{V_o}} \qquad Ecuación\ 1.5$$

1.2 CONVERTIDOR ELEVADOR

Se denomina convertidor elevador (Boost) ya que la salida de tensión es mayor que la de entrada.

Figura 2. Esquema del convertidor elevador.



Fuente: Power electronics. [Esquema]. 3 noviembre de 2014. Disponible en la web: <http://www.powere.dynamictopway.com/dc5.htm>

El funcionamiento de este convertidor se puede dividir en dos estados. El estado 1 empieza cuando el transistor se cierra, en un instante de tiempo cero (t=0); la corriente de entrada pasa por el inductor y el transistor. El estado 2 se inicia cuando el transistor se apaga y la corriente que antes pasaba por el transistor, ahora pasa por el inductor, el capacitor, el diodo y la carga. Cuando la corriente del inductor baja, se enciende nuevamente el transistor dando inicio nuevamente el ciclo. [8]

Las ecuaciones del sistema son:

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \qquad Ecuación\ 1.6$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \qquad Ecuación\ 1.7$$

$$L = factor.L_{min} \qquad Ecuación\ 1.8$$

$$I_{\substack{Lmax \\ Lmin}} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \pm \frac{V_s DT}{2L} \qquad Ecuación\ 1.9$$

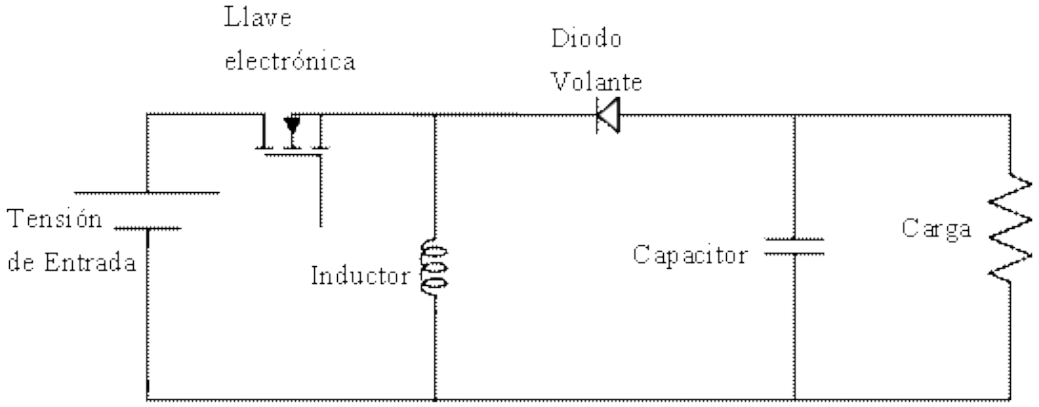
$$C = \frac{D}{Rf\frac{\Delta V_o}{V_o}} \qquad Ecuación\ 1.10$$

1.3 CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR

Un convertidor esencial básico es el convertidor reductor-elevador, donde la salida de este puede ser mayor o menor que la tensión de entrada; la polaridad del voltaje de salida es contraria a la del voltaje de entrada.

El modo 1 inicia cuando el interruptor se encuentra cerrado, en el convertidor se genera una especie de sub-circuito que se encarga de cargar el inductor; el diodo se encuentra polarizado en inversa e impide el flujo de corriente hacia los componentes restantes del circuito. En el modo 2, el interruptor se encuentra abierto, el inductor se descarga e induce una corriente que la cual es forzada a fluir en sentido contrario generando la inversión del voltaje. [9]

Figura 3. Esquema del convertidor reductor-elevador.



Fuente: Convertidor tipo buck-boost. [Esquema]. 4 noviembre de 2014. Disponible en la web: <http://www.monografias.com/trabajos94/proyecto-e-implementacion-convertidor-cc-cc-tipo-buck-control-carga-balasto/image013.gif>

$$V_o = -V_s\left(\frac{D}{1-D}\right) \qquad Ecuación\ 1.11$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \qquad Ecuación\ 1.12$$

$$L = factor.L_{min} \qquad Ecuación\ 1.13$$

$$I_{\substack{Lmax \\ Lmin}} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \pm \frac{V_s DT}{2L} \qquad Ecuación\ 1.14$$

$$C = \frac{D}{Rf\frac{\Delta V_o}{V_o}} \qquad Ecuación\ 1.15$$

1.4 MODO DE FASE CORRECTA DE PWM EN ARDUINO

La modulación por ancho de pulso permite generar ondas cuadradas con una frecuencia determinado, esta técnica que utiliza un ciclo de trabajo de una señal periódica permite enviar información o controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de la señal periódica es el ciclo positivo que se expresa así:

$$D = \frac{\tau}{T} \qquad Ecuación\ 1.16$$

Donde:

- D es el ciclo de trabajo.
- τ es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso).
- T es el periodo de la señal.

En arduino se utilizan los *timers* para generar la salida de PWM, estos *timers* varían dependiendo de la versión del microcontrolador *atmega* del arduino.

El modo de fase correcta de PWM utilizado en arduino proporciona una forma de generación de la onda en alta resolución. Este modo se basa en una doble pendiente.

La frecuencia de salida cuando se usa el modo de fase correcta de PWM, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

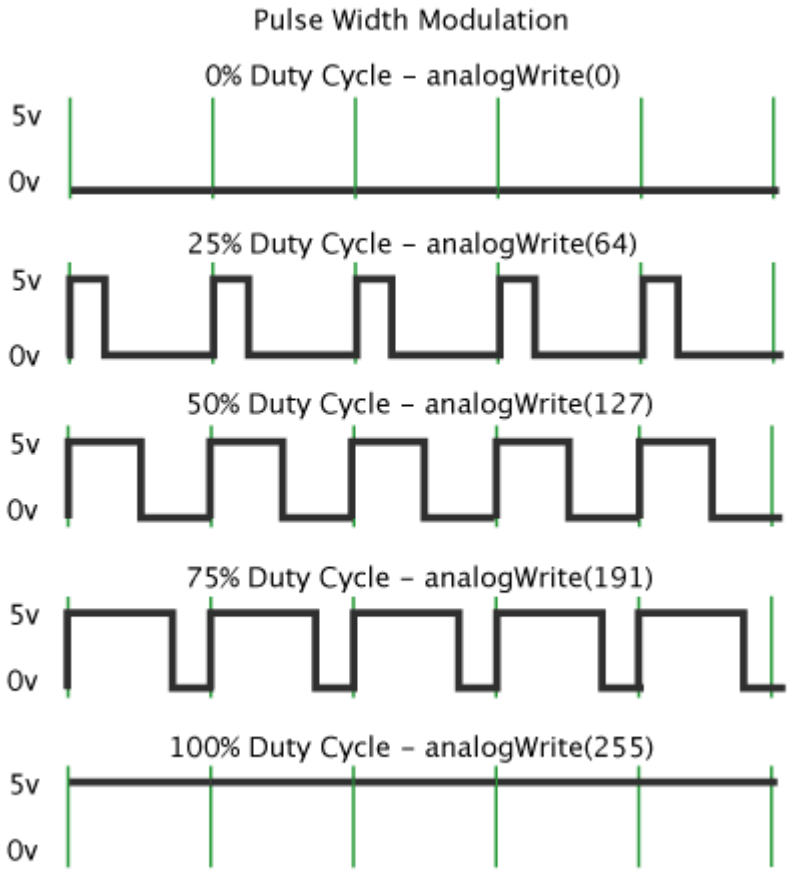
$$f = \frac{f_{clk}}{2 * N * TOP} \qquad Ecuación\ 1.17$$

Donde:

- N es la variable que representa el divisor prescaler (1, 8, 64, 256 ó 1024).
- TOP es el valor máximo que va a tomar la señal 0 a 255.
- *Fclk* es la frecuencia del reloj del arduino (16 MHz).

Al utilizar el comando *analogWrite()* se utiliza una escala de 0 a 255, donde 255 representa una señal del 100% del ciclo de trabajo (siempre encendido), y una señal de 127 representa el 50% del ciclo de trabajo. Estas señales se pueden observar en la siguiente figura:

Figura 4. Señal del PWM en arduino.



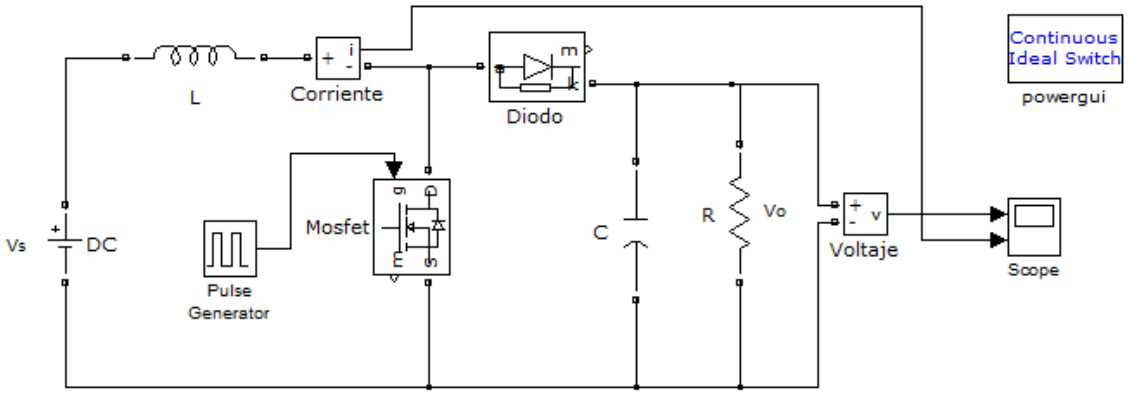
Fuente: PWM arduino. [Diagrama]. 17 de noviembre de 2014. Disponible en la web: <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>

2. MODELADO Y DISEÑO DEL CONVERTIDOR CC-CC BOOST

2.1 MODELO DEL CONVERTIDOR BOOST

Para el diseño del convertidor CC-CC elevador, se desarrolla un modelo dinámico del sistema como objetivo inicial, con base en las leyes de Kirchhoff, aplicándose para cada estado del circuito del convertidor. Se utiliza una técnica que le denominan *"modelo en pequeña señal"*, que consiste básicamente a un equivalente lineal, que responde a pequeñas perturbaciones [5]. Los siguientes diagramas se desarrollaron en el software *Simulink* de *MATLAB.*

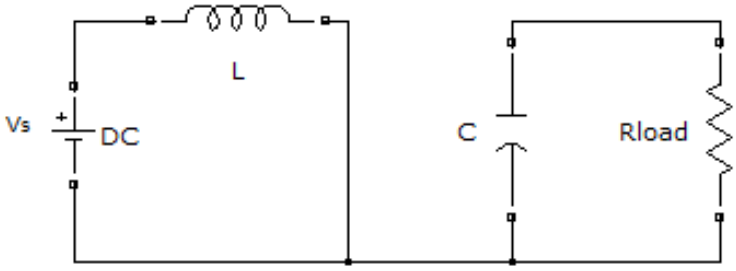
Figura 5. Diagrama en Simulink, convertidor elevador.



Fuente: [Autores].

Para el interruptor cerrado las ecuaciones quedan así:

Figura 6. Esquema convertidor elevador, con interruptor cerrado.



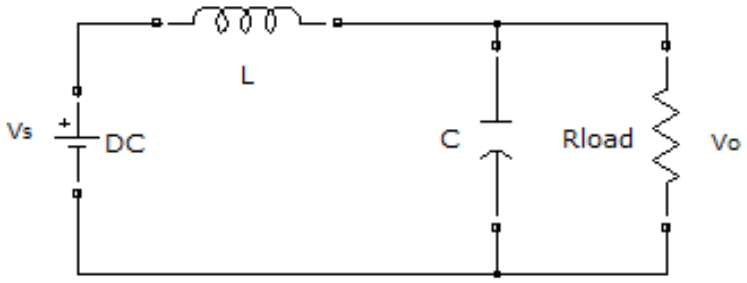
Fuente: [Autores].

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_s}{L} \quad Ecuación\ 2.1$$

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{v_o}{R} \quad Ecuación\ 2.2$$

Para el interruptor abierto las ecuaciones son las siguientes:

Figura 7. Esquema convertidor elevador, con interruptor abierto.



Fuente: [Autores].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_s - v_o}{L} \qquad Ecuación\ 2.3$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_l}{C} - \frac{v_o}{RC} \qquad Ecuación\ 2.4$$

2.1.1 Parametrizar.

Se expresa el sistema de ecuaciones en un único sistema bilineal. Para esto se define un parámetro $\mu_{(t)}$ [4]. Así:

$\mu_{(t)} = 0$, cuando el interruptor no conduce.

$\mu_{(t)} = 1$, cuando el interruptor conduce.

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_s}{L} - \frac{v_o}{L} * \mu_{(t)} \qquad Ecuación\ 2.5$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L}{C} * \mu_{(t)} - \frac{v_o}{R * C} \qquad Ecuación\ 2.6$$

2.1.2 Promediar.

Se utiliza un método de promediado, para simplificar las ecuaciones que rigen la dinámica del convertidor de la siguiente manera:

$$\langle x_{(t)} \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x_{(\tau)} d\tau \quad Ecuación\ 2.7$$

Ahora se encuentran los valores promedios de $v_{l(t)}$ y de $i_{c(t)}$

$$\langle v_{l(t)} \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v_{l(\tau)} d\tau \quad Ecuación\ 2.8$$

$$\langle i_{c(t)} \rangle = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} i_{c(\tau)} d\tau \quad Ecuación\ 2.9$$

De las ecuaciones (2.8) y (2.9), se llega al resultado del sistema promediado así:

$$\frac{di_{L(t)}}{dt} = \frac{v_s}{L} - \frac{v_o}{L} * u_{(t)} \quad Ecuación\ 2.10$$

$$\frac{dv_{o(t)}}{dt} = \frac{i_L}{C} * u_{(t)} - \frac{v_o}{RC} \quad Ecuación\ 2.11$$

2.1.3 Linealización.

Para la linealización del sistema se aplica la expansión por series de Taylor.

$$\Delta \dot{x}_j = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f_j}{\partial x_k}\Big|_{x_0,u_0} (x_k - x_{k0}) + \sum_{k=1}^{p} \frac{\partial f_j}{\partial u_k}\Big|_{x_0,u_0} (u_k - u_{k0}) \quad Ecuación\ 2.12$$

Para que el modelo en pequeña señal quede adecuadamente linealizado, se encuentran los valores promedios de las variables de interés, y se trabaja alrededor de un punto de operación fijo en estado estable, así: V_{s0}, I_{L0} y V_{o0} [5]. Se muestra en las siguientes ecuaciones los deltas o cambios de la variable:

$$\Delta v_{s(t)} = v_{s(t)} - V_{s0} \quad Ecuación\ 2.13$$

$$\Delta i_{L(t)} = i_{L(t)} - I_{L0} \quad Ecuación\ 2.14$$

$$\Delta v_{o(t)} = v_{o(t)} - V_{o_0} \quad Ecuación\ 2.15$$

Los valores $\Delta v_{s(t)}$, $\Delta i_{L(t)}$ y $\Delta v_{o(t)}$, se consideran como una perturbación al sistema. Se asume que estas perturbaciones son más pequeñas que los valores de V_{s0}, I_{L0} y V_{o_0} que se toman como valores de estado estable, donde los valores promedios de $v_{s(t)}$, $i_{L(t)}$ y $v_{o(t)}$ se mantendrán muy cerca a los valores del punto de operación [5].

Se procede a linealizar mediante la expansión de las series de Taylor, derivando parcialmente sobre los valores promedios de las ecuaciones (2.10) y (2.11). Quedando linealizado el sistema así:

$$\dot{\Delta} i_{L(t)} = \frac{1}{L}\Delta v_{s(t)} - \frac{U_0}{L}\Delta v_{0(t)} - \frac{V_{o0}}{L}\Delta u_{(t)} \quad Ecuación\ 2.16$$

$$\dot{\Delta} v_{o(t)} = \frac{U_0}{C}\Delta i_{L(t)} - \frac{1}{RC}\Delta v_{0(t)} - \frac{I_{L0}}{C}\Delta u_{(t)} \quad Ecuación\ 2.17$$

2.1.4 Espacio de estados.

Al tener el sistema linealizado se puede expresar en el espacio de estados, primero se hace el cambio a variables de estado:

$$\Delta x_1 = \Delta i_L \ ; \ \Delta x_2 = \Delta v_o \ ; \ \dot{\Delta} x_1 = \dot{\Delta} i_L \ ; \ \ \dot{\Delta} x_2 = \dot{\Delta} v_o$$

El espacio de estados que representa la dinámica del sistema lineal es [14]:

$$\dot{\Delta} x = A\Delta x + B\Delta u \qquad Ecuación\ 2.18$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \qquad Ecuación\ 2.19$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta} x_1 \\ \dot{\Delta} x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-U_0}{L} \\ \frac{U_0}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{-V_{o0}}{L} \\ 0 & \frac{i_{Lo}}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_s \\ \Delta u \end{bmatrix} \qquad Ecuación\ 2.20$$

$$[\Delta v_o] = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \qquad Ecuación\ 2.21$$

2.2 DISEÑO DEL CONVERTIDOR CC-CC BOOST

Para el diseño del sistema se determinan los parámetros principales de los cuales consta el convertidor CC-CC elevador. En la Tabla 1, se hizo uso de las siguientes ecuaciones [13]:

Tabla 1. Parámetros de diseño.

Parámetro	Ecuación
Ciclo de trabajo k	$k = \frac{V_o - V_s}{V_o}$
Corriente de rizo pico a picoΔ_I	$\Delta I = \frac{V_s k}{fL}$
Corriente promedio a la entrada I_s	$I_s = \frac{I_o}{1-k}$
Corriente pico del inductor I_2	$I_2 = I_s + \frac{\Delta I}{2}$
Voltaje pico a pico de capacitor ΔV_c	$\Delta V_c = \frac{I_o k}{fC}$
Valor critico de inductor L_c	$L_c = \frac{k(1-k)V_o}{2fI_o}$
Valor critico de capacitor C_c	$C_c = \frac{kI_o}{2fV_o}$

Fuente: [Autores].

Donde:

I_o: Corriente en la carga

V_s: Tensión de alimentación

V_o: Tensión de carga

f: Frecuencia de conmutación

Haciendo uso de las ecuaciones mencionadas en la Tabla 1, se diseñó dos convertidores elevadores con distintas cargas. La Tabla 2 muestra las especificaciones de diseño.

Tabla 2. Especificaciones de diseño

Variable	Convertidor 1	Convertidor 2
Tensión de alimentación (V_s)	12 [V]	12 [V]
Tensión de carga (V_o)	18 [V]	24 [V]
Frecuencia de conmutación (f)	31370 [Hz]	31370 [Hz]
Corriente en la carga (I_o)	0,015 [A]	0,075 [A]
Inductor (L)	8,83 [mH]	8,83 [mH]
Capacitor (C)	220 [μF]	220 [μF]

Fuente: [Autores].

En la siguiente tabla se observa los valores que se obtienen con la ayuda de las ecuaciones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 3. Resultados de parámetros de diseño.

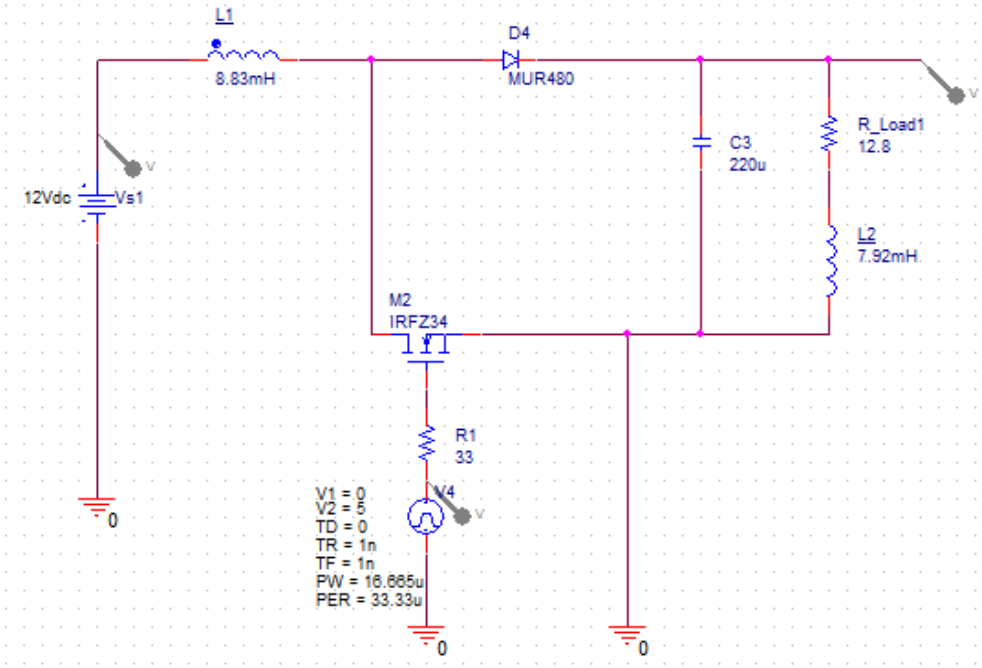
Variable	Convertidor 18 V	Convertidor 24 V
k	0,3333	0,5
Δ_L	0,01 A	0,02 A
I_s	0,0225 A	0,15 A
I_2	0,03 A	0,161 A
ΔV_c	0,00072 V	0,00543 V
L_c	0,00425 H	0,001275 H
C_c	$4{,}43x10^{-9}$F	$2{,}49x10^{-8}$F

Fuente: [Autores].

Las simulaciones de los convertidores con distintas cargas se realizaron en el *software OrCAD Capture*; con el objetivo de que la simulación se ejecute con referencias de componentes que se consiguen en el mercado local, con estas particularidades se construyen los esquemas de los convertidores elevadores.

En la siguiente figura se puede observar el esquema del elevador para 24 volts.

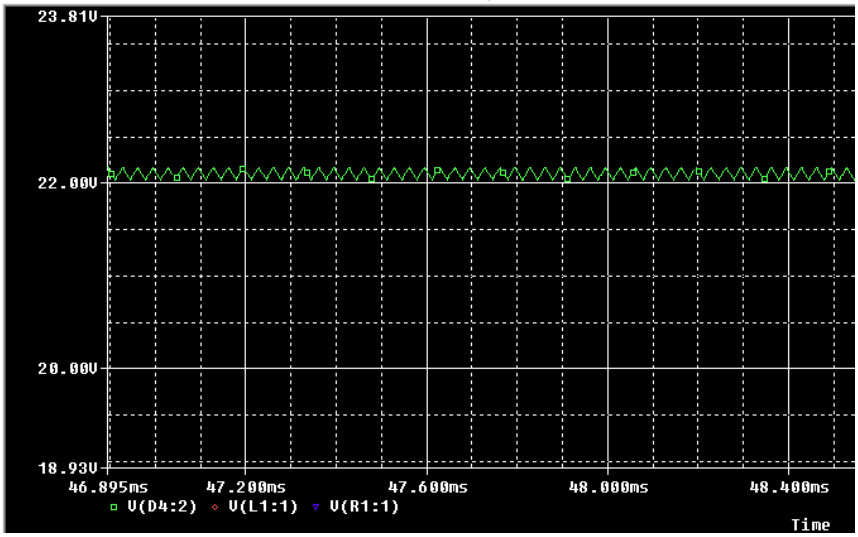
Figura 8. Esquema convertidor elevador de 24 volts, software OrCAD.



Fuente: [Autores].

La figura (9) muestra el convertidor de 12 a 24 volts, donde se puede ver que el sistema en lazo abierto tiene una pérdida de 2 volts, ya que los componentes del software *OrCAD* tienen una aproximación al comportamiento real del elemento, gracias a su completo modelo *PSpice*, lo que hace que el software de simulación sea muy completo a la hora de hacer estos análisis.

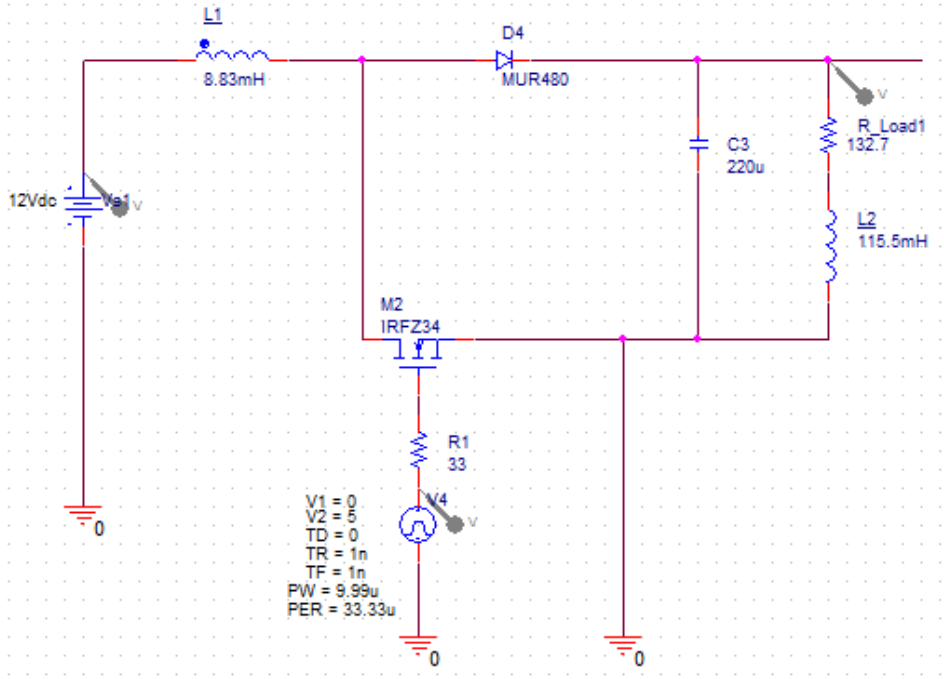
Figura 9. Gráfica convertidor elevador de 24 volts, software OrCAD.



Fuente: [Autores].

Para el convertidor que tiene como salida un voltaje de 18 volts se desarrolla el mismo ejercicio, los componentes principales quedan intactos y solo se cambia la carga del sistema, el esquema con sus componentes es el siguiente:

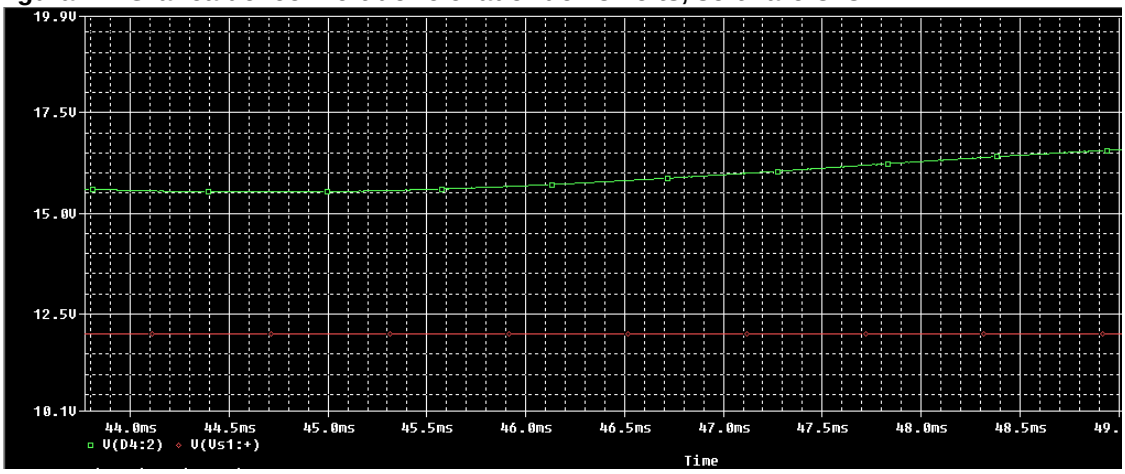
Figura 10. Esquema convertidor elevador de 18 volts, software OrCAD.



Fuente: [Autores].

La señal de salida se muestra en la figura 11.

Figura 11. Gráfica del convertidor elevador de 18 volts, software OrCAD.

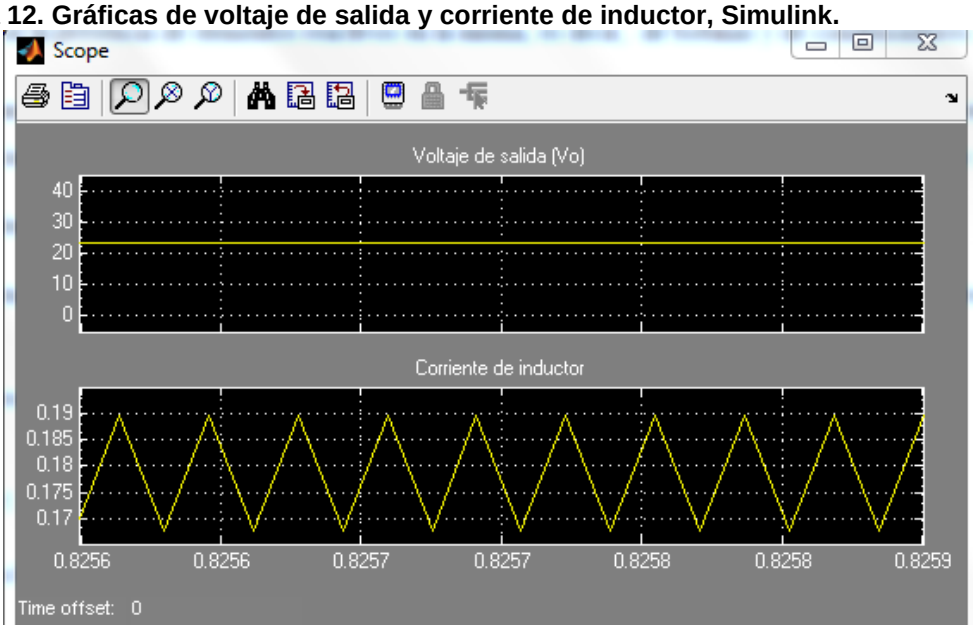


Fuente: [Autores].

De la figura anterior se puede destacar que el sistema en lazo abierto solo tiene una pérdida de 1.5 volts.

Las gráficas generadas del convertidor en lazo abierto del voltaje de salida y la corriente del inductor, también se generaron en el software *MATLAB* en *Simulink*. En la siguiente figura, se observa el comportamiento del sistema en modo de conducción continua.

Figura 12. Gráficas de voltaje de salida y corriente de inductor, Simulink.



Fuente: [Autores].

2.3 CARGA DEL CONVERTIDOR ELEVADOR

Para el convertidor elevador se utilizan dos cargas inductivas, son motores DC. Las características de estos motores se encuentran en la siguiente tabla.

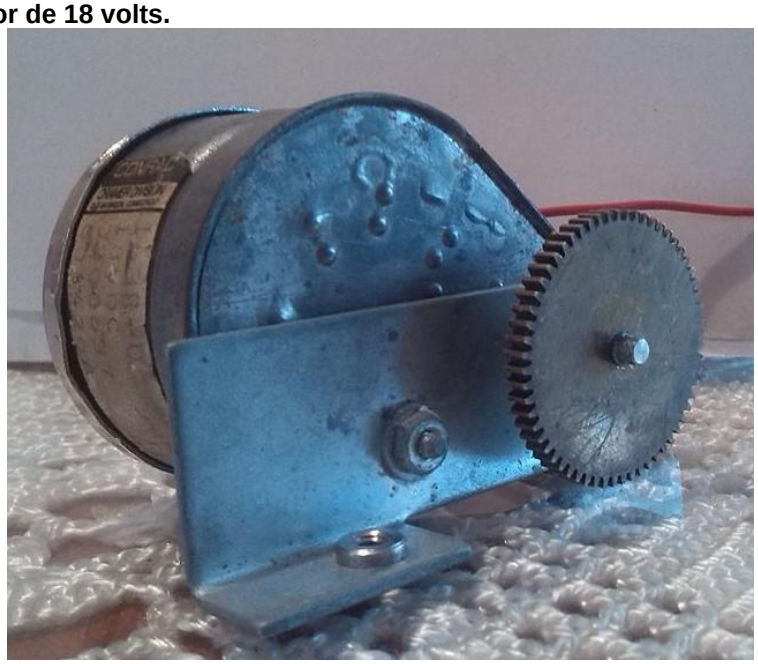
Tabla 4. Características básicas de los motores.

Parámetros	**Motor 18 [V]**	**Motor 24 [V]**
Resistencia	132,7Ω	12,8 Ω
Inductancia	115,5mH	7,92mH
Capacitancia	-2,04 μF	-23,9 μF

Fuente: [Autores].

En la siguiente figura se puede observar el motor de 18 volts, donde se puede ver la caja reductora del mismo.

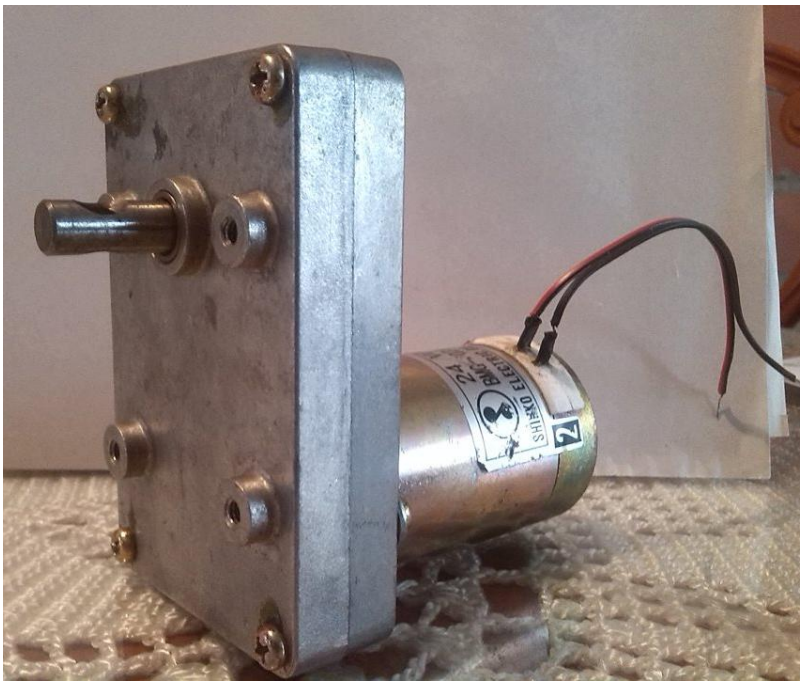
Figura 13. Motor de 18 volts.



Fuente: [Autores].

El motor de 24 volts se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 14. Motor de 24 volts.



Fuente: [Autores].

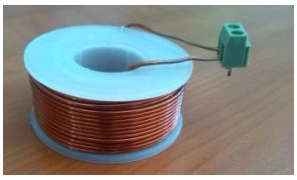
Los motores mostrados en las figuras (13) y (14), se utilizarán para las prácticas de laboratorio, que permitirán el análisis del comportamiento del sistema ante estas cargas inductivas.

2.4 ANÁLISIS DE LOS INDUCTORES

Para el convertidor elevador se cuenta con dos inductores que se pretenden utilizar en las prácticas con el prototipo del circuito, donde se toman en cuenta las características de estos dos, para observar el comportamiento en el sistema. El objetivo principal del estudio sobre el comportamiento de los bobinados, es determinar cuál de los dos inductores según sus características generales, es el indicado para un funcionamiento adecuado del convertidor.

En la Tabla 5, se puede apreciar las características de los dos inductores que se aplicarán en el análisis del circuito.

Tabla 5. Características de los inductores a implementar.

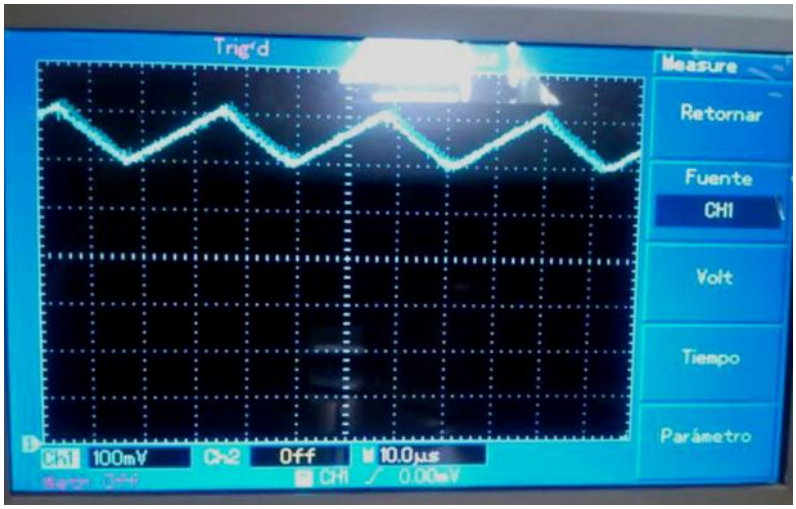
Parámetro	**Inductor 1**	**Inductor 2** 
Resistencia (Ohm)	3.5Ω	0.5Ω
Capacitancia (Farads)	-104.06 μF	-152.02 μF
Inductancia (Henrios)	8,83 mH	0,372 mH

Fuente: [Autores].

2.4.1 Inductor 1.

La gráfica de la señal de corriente en el inductor 1 se tomó gracias al osciloscopio [Ver anexo A], que se encuentra en el laboratorio de ingeniería mecatrónica. Se puede apreciar en la siguiente figura la señal del inductor.

Figura 15. Gráfica de corriente sobre el inductor 1.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

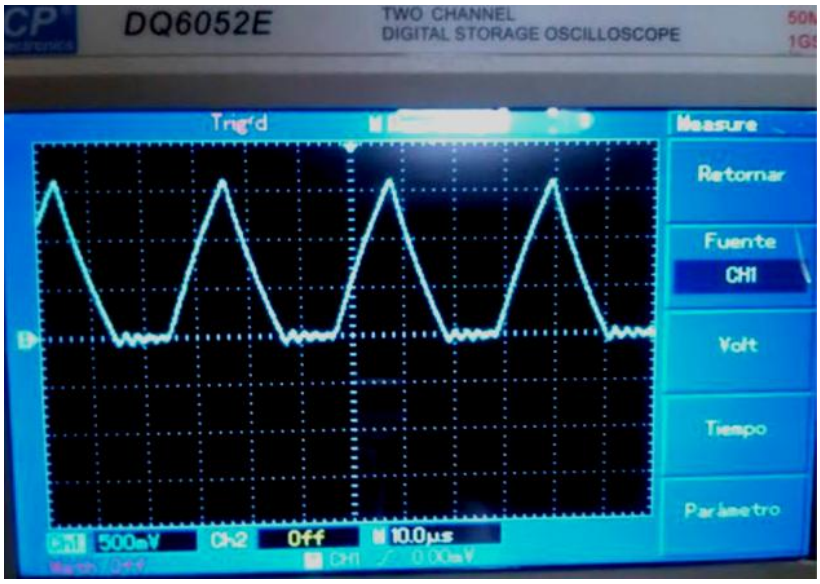
Al observar la figura (15), se puede concluir que el circuito está trabajando adecuadamente, ya que se encuentra en funcionamiento de modo continuo, por ende la corriente sobre el inductor (i_L) nunca cae a cero.

Al analizar el sistema con este inductor, se presenta un funcionamiento correcto teniendo en cuenta que las cargas aplicadas para esta práctica son motores DC.

2.4.2 Inductor 2.

En la figura 16, se puede apreciar la gráfica de corriente sobre el inductor 2, donde se aprecia que el sistema entra en modo de conducción discontinua.

Figura 16. Gráfica de corriente sobre el inductor 2.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Ya que el sistema entra en modo de conducción discontinua, la corriente que pasa por el inductor (i_{Lo}) cae en un intervalo de tiempo a cero.

En este caso el inductor tiene un valor de inductancia mucho menor, lo que ocasiona que en uno de esos intervalos de tiempo se descargue mucho más rápido que el tiempo de apagado del PWM, lo que causa que llegue a cero la corriente de inductor, si se aumenta por lo menos 3 veces más la frecuencia del PWM, el tiempo de descarga del inductor podría no ser más rápido que el tiempo de apagado del PWM y quedaría en el límite del modo de conducción continua.

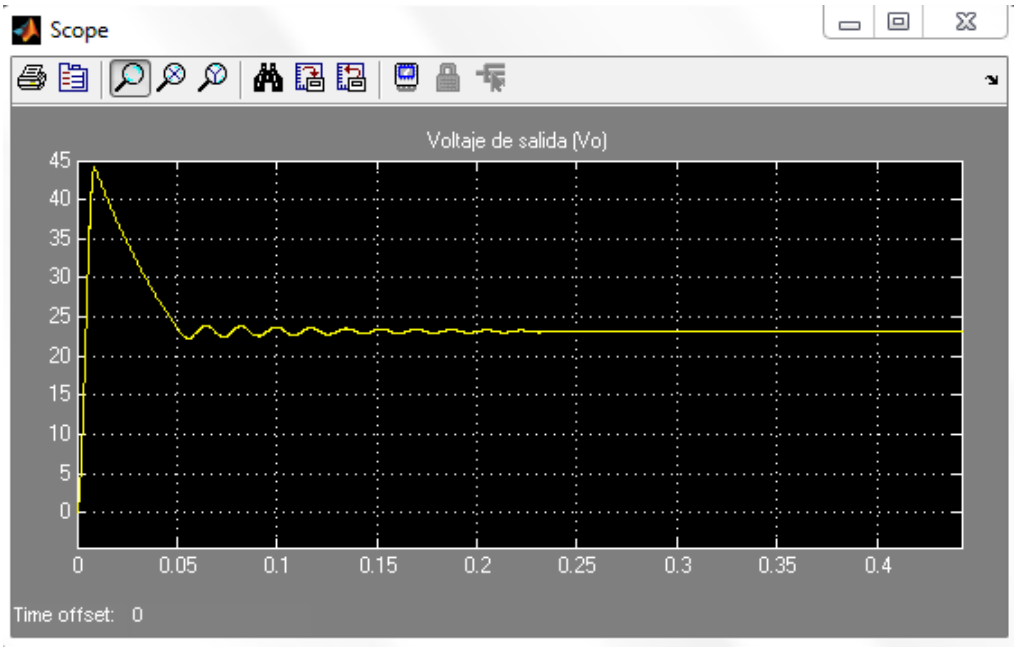
Debido a que las cargas son inductivas el sistema con este inductor entra en un modo de resonancia con la carga, donde la energía almacenada en la bobina y el condensador son máximos, esto genera que haya un aumento en el voltaje y produciendo un ruido sobre los motores. Este aumento de tensión puede provocar daños sobre el sistema.

2.5 PROTOTIPO DEL CONVERTIDOR ELEVADOR.

Para estas prácticas se utilizó un arduino *mega2560*, que permite una salida de PWM que va a la compuerta del *MOSFET*. El experimento se realizó con el sistema en lazo abierto para las pruebas iniciales de funcionamiento.

La simulación en lazo abierto del convertidor elevador, se efectuó en *MATLAB*, obteniendo la siguiente gráfica:

Figura 17. Gráfica en lazo abierto.

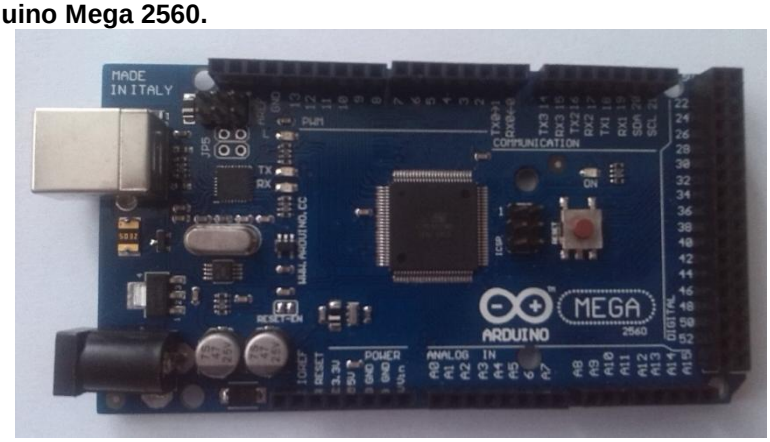


Fuente: [Autores].

En la figura anterior, se alcanza a apreciar el sobre-pico que supera el 25% del valor del voltaje esperado, que luego cae de forma oscilatoria al valor estimado de salida.

El arduino *mega 2560*, que se usó en el prototipo, se puede ver en la siguiente figura.

Figura 18. Arduino Mega 2560.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

En la siguiente figura se aprecia el sistema en lazo abierto del convertidor CC-CC elevador con las cargas de 18 y 24 volts.

Figura 19. Sistema en lazo abierto del convertidor elevador.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Para las pruebas se utilizó los valores de los componentes ya planteados en las especificaciones de diseño de la Tabla 2.

Se verificó la señal del PWM que llega al inductor, por medio del osciloscopio [Ver anexo A]. El sistema tiene conectado la carga de 24 volts, tiene un funcionamiento estable y adecuado a los parámetros diseñados anteriormente.

Figura 20. Convertidor elevador en funcionamiento con el osciloscopio.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Las pruebas sobre este prototipo se desarrollaron con el inductor 1, ya que con este el sistema funciona en modo de conducción continua y no genera armónicos sobre la carga, que evita que se produzca vibración y ruido en el motor, este inductor se utilizará para la implementación de todo el sistema.

3. DISEÑO DE CONTROLADOR

3.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Para hacer el análisis de las funciones de transferencias se parte del modelo lineal visto en las ecuaciones (2.16) y (2.17), y se procede a desarrollar la transformada de Laplace de las ecuaciones para aplicar sobre este la técnica de control.

Se asumen condiciones iniciales iguales a cero (“0”) y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$s\Delta I_{L(s)} = \frac{1}{L}\Delta V_{s(s)} - \frac{U_0}{L}\Delta V_{0(s)} - \frac{V_{o0}}{L}\Delta U_{(s)} \qquad Ecuación\ 3.1$$

$$s\Delta V_{o(s)} = \frac{U_0}{C}\Delta I_{L(s)} - \frac{1}{RC}\Delta V_{0(s)} + \frac{i_{L0}}{C}\Delta U_{(s)} \qquad Ecuación\ 3.2$$

Se despeja de la ecuación (3.1) la transformada de la variación de la corriente en el inductor ($\Delta I_{L(s)}$), y se sustituye en la ecuación (3.2) para la factorización de los términos similares, y en el lado derecho se agrupan los términos cuyos factores comunes son $\Delta V_{s(s)}$ y $\Delta U_{(s)}$, quedando la ecuación así:

$$\Delta V_{o(s)} = \frac{U_0}{LC}\frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{U_0^2}{LC}}\Delta V_{s(s)} + \frac{1}{LC}\frac{(i_{L0}Ls - U_0V_{o0})}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{U_0^2}{LC}}\Delta U_{(s)} \qquad Ecuación\ 3.3$$

En la ecuación (3.3) se puede observar que la dinámica del sistema se define por dos funciones de transferencia, una donde la entrada es el cambio del voltaje de entrada ($\Delta V_{s(s)}$) y la otra cuya entrada es el cambio en el ciclo de trabajo ($\Delta U_{(s)}$).

La función de transferencia que relaciona la salida de voltaje del convertidor, con la entrada del cambio de ciclo de trabajo es:

$$\frac{\Delta V_{o(s)}}{\Delta U_{(s)}} = \frac{1}{LC} * \left.\frac{(i_{L0}Ls - U_0V_{o0})}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{U_0^2}{LC}}\right|_{\Delta V_{s(s)}=0} \qquad Ecuación\ 3.4$$

3.2 ECUACIÓN EN DIFERENCIAS DEL CONTROLADOR.

Se parte de la ecuación del modelo PI, en el espacio de la transformada de Laplace así [15]:

$$C_{(s)} = Kp + \frac{Ki}{s} \qquad Ecuación\ 3.5$$

Ahora se procede a hacer la discretización por la aproximación por diferencias hacia adelante.

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{hz^{-1}} \quad Ecuación\ 3.6$$

Donde h, es el periodo de muestreo del sistema. Se hace el cambio a la transformada z, así:

$$C_{(z)} = \frac{Kp - Kpz^{-1} + Kihz^{-1}}{1 - z^{-1}} \qquad Ecuación\ 3.7$$

Se factorizan con respecto a la transformada z. Donde se hacen cambio de notación para las constantes así:

$C_0 = Kp$, $C_1 = (Kih - Kp)$, De esta forma se reescribe la ecuación así:

$$C_{(q)} = \frac{C_0 + C_1 q^{-1}}{1 - q^{-1}} \qquad Ecuación\ 3.8$$

Luego se aplica la siguiente ecuación [11]:

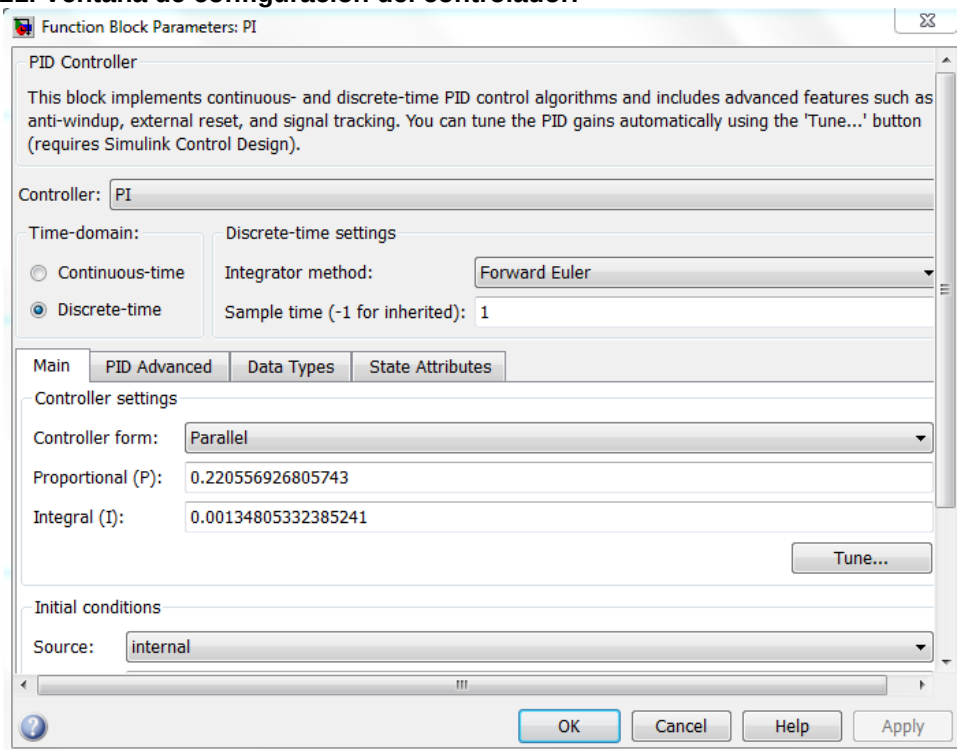
$$u_{[k]} = C_{(q)} e_{[k]} \quad Ecuación\ 3.9$$

Se reemplaza la ecuación (3.8) en la ecuación (3.9), quedando la ecuación en diferencias, que vendría en el sistema digital así:

$$u_{[k]} = u_{[k-1]} + C_0 e_{[k]} + C_1 e_{[k-1]} \qquad Ecuación\ 3.10$$

Las constantes C_0 y C_1, se obtienen de la sintonización hecha desde *MATLAB*, con la opción *"Tune"*, se sintoniza el controlador y se configuran el método de discretización y el tiempo de muestreo para el controlador. En la siguiente figura se puede apreciar la ventana de configuración.

Figura 21. Ventana de configuración del controlador.



Fuente: [Autores].

Los valores encontrados con la herramienta del controlador, son los siguientes:

$$C_o = 0.241317$$

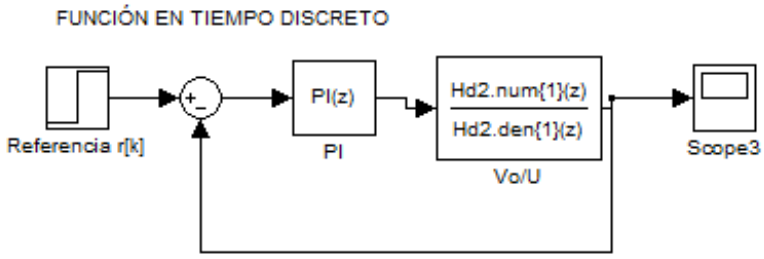
$$C_1 = 0.002868$$

3.3 CONTROLADOR

Para la aplicación del controlador se utiliza el software *MATLAB*, donde se desarrolla el análisis del sistema en tiempo discreto y se obtienen las funciones de transferencia, el objetivo es calcular y sintonizar las constantes que componen el controlador PI para el convertidor CC-CC elevador.

En Simulink se hace el diagrama de bloques en lazo cerrado, acoplando el controlador PI. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques en lazo cerrado.

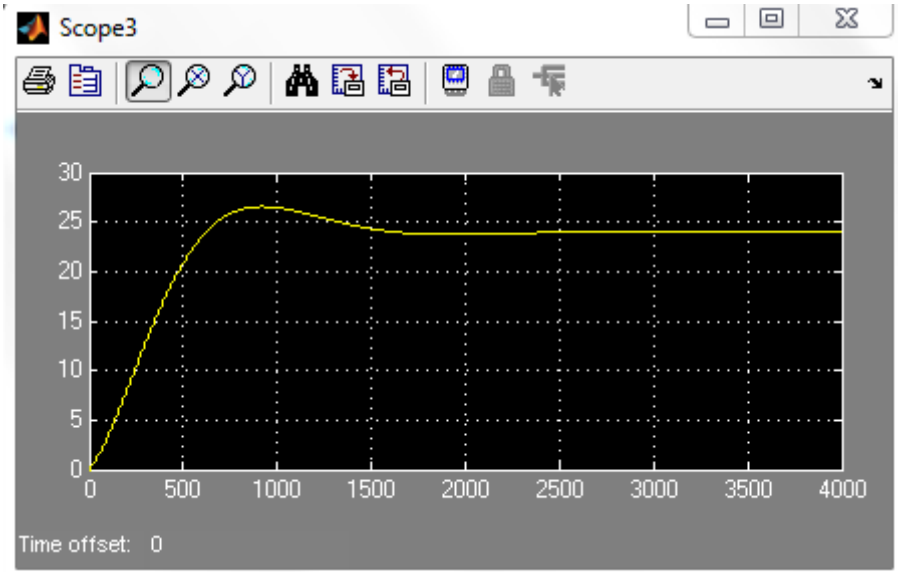
Figura 22. Diagrama de bloques, lazo cerrado en tiempo discreto.



Fuente: [Autores].

La figura anterior muestra el bloque del controlador PI, sintonizado con el *PIDTOOL* de *MATLAB*. Al sintonizarlo con la ayuda del software se obtiene la siguiente gráfica.

Figura 23. Gráfica de la señal de salida con el controlador PI sintonizado.



Fuente: [Autores].

El controlador atenúa la señal y evita el sobre-pico inicial de voltaje, que se le denomina sobre-oscilación, esta gráfica se muestra en la figura (17), donde se observa el sistema en lazo abierto; esta corrección en la salida hace que el sistema incremente lentamente el voltaje hasta llegar a la referencia, sin causar una sobretensión en el motor demasiado abrupta que genere problemas en la carga del circuito, como ocurría con el convertidor sin su controlador. En la figura anterior se puede ver que la respuesta es sub-amortiguada y no tiene oscilaciones pequeñas para llegar a estado estacionario.

3.4 PROTOTIPO DEL CONVERTIDOR ELEVADOR EN LAZO CERRADO.

La retroalimentación al sistema se lleva a cabo por medio de un divisor de tensión, el cual es el sensor del sistema que permite cerrar el lazo y llegar al microcontrolador para que este procese su señal y el algoritmo de control corrija la señal.

El esquema del divisor de tensión, se elaboró en Simulink, el resultado que da la salida del sensor se halla con la siguiente ecuación.

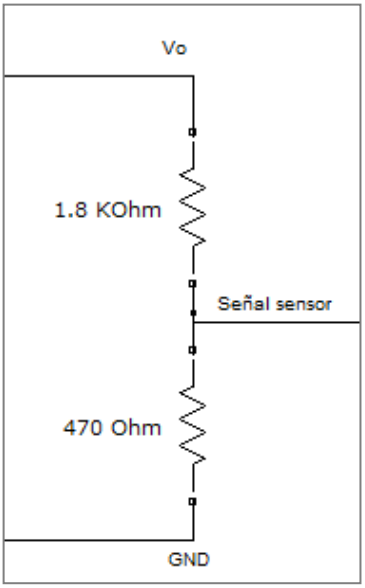
$$Señal\ sensor = \frac{470[\Omega]}{(470\ [\Omega] + 1.8\ [K\Omega])} * 24\ [V] \qquad Ecuación\ 3.11$$

$$Señal\ sensor = 4.978\ [V]$$

El sensor, escala la salida de voltaje del convertidor, a un voltaje de 0 a 5 que se puede ingresar al microcontrolador, para que el sistema pueda hacer la conversión análogo-digital.

La siguiente figura, muestra el esquema de conexión del sensor.

Figura 24. Divisor de tensión, sensor del convertidor elevador.

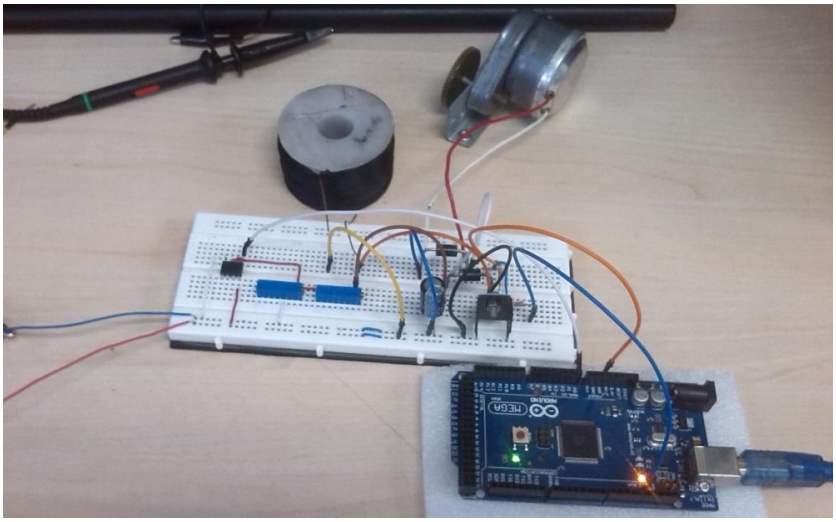


Fuente: [Autores].

La implementación del modelo físico, se elaboró en un *protoboard*, el sistema está en lazo cerrado, gracias al sensor que hace la retroalimentación al convertidor.

En la figura 25, se puede ver el circuito completo, con la puesta en marcha del motor de 18 volts y con el *arduino mega 2560*.

Figura 25. Sistema en protoboard, lazo cerrado con motor de 18 volts.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

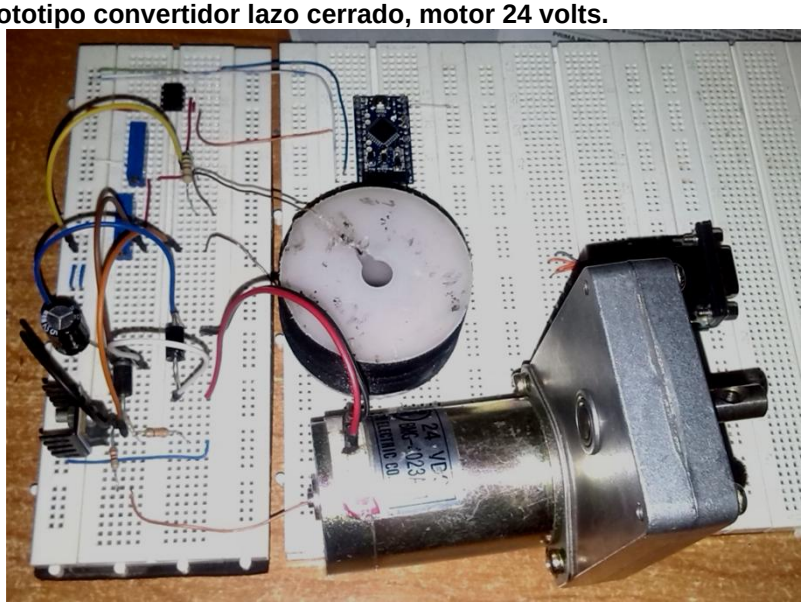
El arduino utilizado para la práctica final es el pro-mini *atmega 328*, la versión de 5 volts y de 16MHz.

Figura 26. Arduino pro-mini atmega328.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

La siguiente figura, muestra el convertidor en lazo cerrado con la carga de 24 volts y el *arduino pro-mini atmega328*.

Figura 27. Prototipo convertidor lazo cerrado, motor 24 volts.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Al desarrollar la práctica en lazo cerrado sobre un protoboard, el convertidor no presenta un sobre-impulso que supere el 25%, lo cual es aceptable para los requerimientos de diseño. El tiempo de subida en el estado transitorio es aproximadamente un segundo, lo que presenta una respuesta más lenta si se genera una perturbación abrupta en la carga.

4. CONSTRUCCIÓN Y RESULTADOS

4.1 CONSTRUCCIÓN

4.1.1 Estructura del módulo.

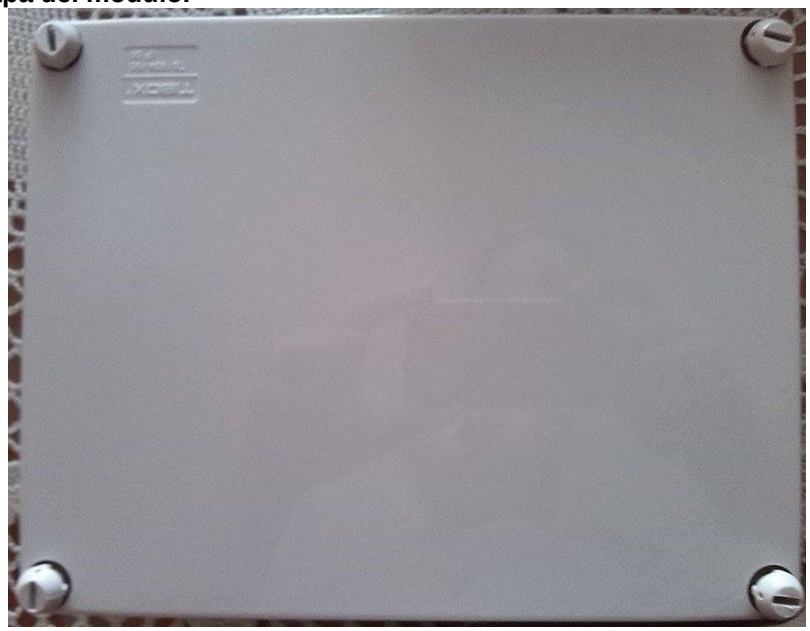
Para la construcción del módulo convertidor CC-CC elevador, se utiliza una caja rectangular usada para acometida eléctrica, la caja es de plástico para aislar los cables y tiene una seguridad IP 56. La siguiente figura muestra la vista superior de la caja usada para la construcción del módulo, donde se puede apreciar el interior del mismo.

Figura 28. Caja para construcción del módulo.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Se le hacen perforaciones a la tapa de la caja para ensamblar los terminales, que permitirán conectar los cables del módulo. La siguiente figura muestra la tapa del armazón del circuito.

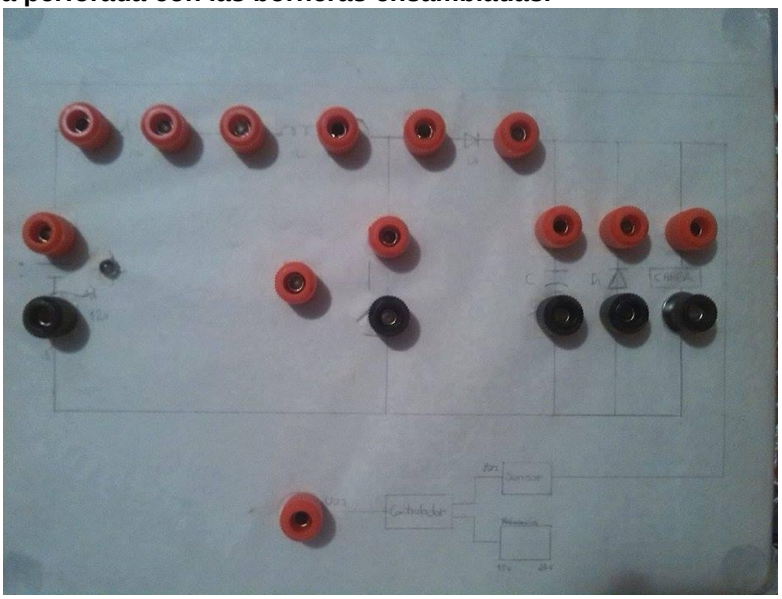
Figura 29. Tapa del módulo.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

La tapa del módulo lleva un adhesivo con el diagrama de conexión y las borneras. El diseño de la distribución de las borneras en la tapa perforada se puede observar en la siguiente figura.

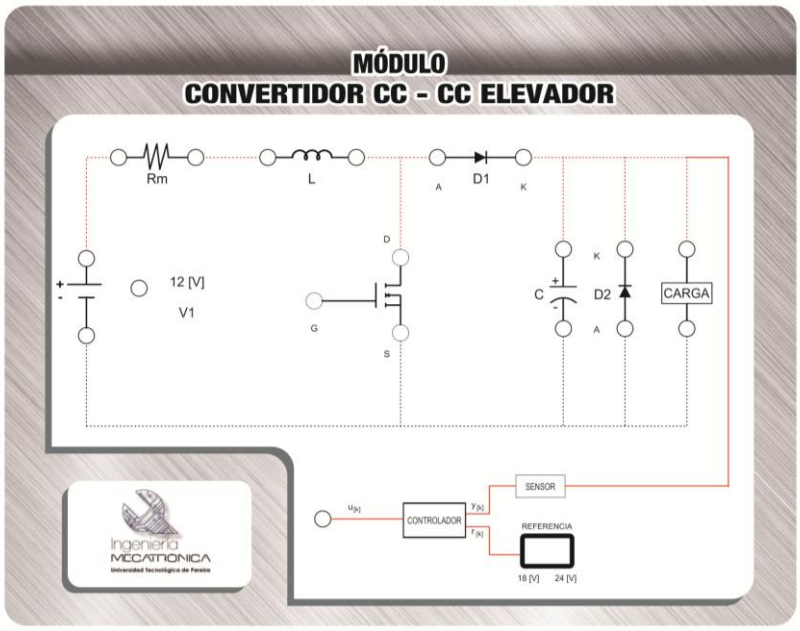
Figura 30. Tapa perforada con las borneras ensambladas.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

El diseño del adhesivo para la tapa, se plastificó para evitar la suciedad y que le caiga algún líquido y se dañe el esquema. Se puede apreciar en la siguiente figura el plano de la etiqueta.

Figura 31. Diseño del adhesivo.



Fuente: [Autores].

La figura 32, muestra el módulo del convertidor.

Figura 32. Módulo convertidor CC-CC elevador.

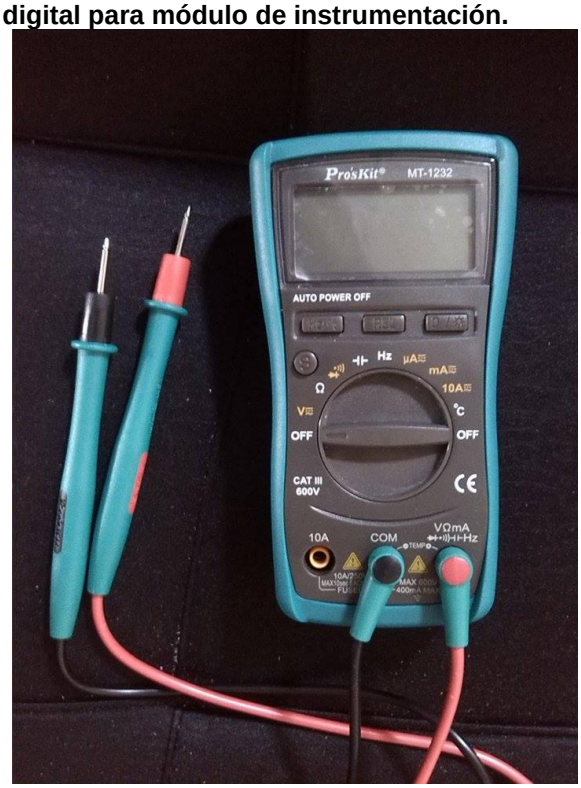
Fuente: [Fotografía]. [Autores].

El módulo del convertidor CC-CC elevador, completamente ensamblado se aprecia en la figura anterior. A un costado de la caja se encuentra el botón de

encendido y el conector para la fuente de alimentación, cuenta con instructivo básico como guía de funcionamiento. [Ver anexo E].

Se utiliza un Multímetro digital de marca *PrósKit* [Ver anexo C], como módulo de instrumentación que permite medir frecuencia, duty cycle, voltaje, resistencia, entre otras variables. El Multímetro se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 33. Multímetro digital para módulo de instrumentación.

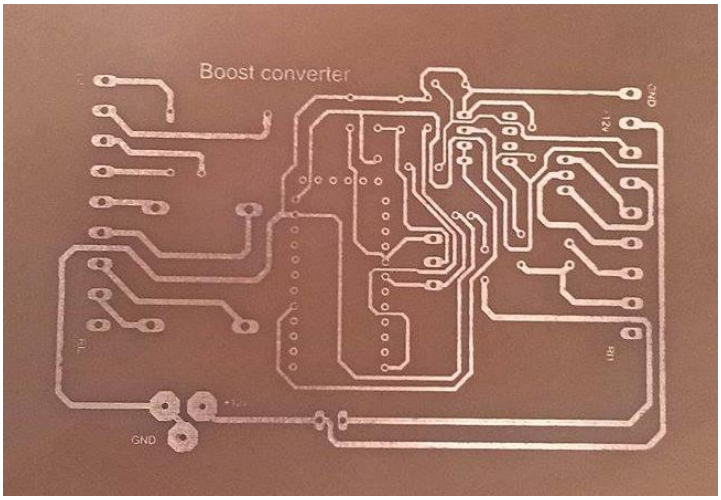


Fuente: [Fotografía]. [Autores].

4.1.2 Circuito impreso

La placa del circuito del módulo ya quemada en baquela, se puede observar en la figura (34). El circuito impreso y la serigrafía se encuentran en los anexos del documento [ver anexo D].

Figura 34. Placa del módulo convertidor.



Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Se soldaron los componentes en el circuito impreso quemado en baquela, que conforman el circuito del módulo convertidor CC-CC elevador. Se puede observar los elementos ya soldados en la placa en la siguiente figura.

Figura 35. Circuito completo del módulo.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

En la figura anterior, se puede apreciar las borneras del circuito, las cuales permitirán conectar los cables que vienen de la tapa del módulo.

4.1.3 Fuente de alimentación del módulo.

Se utiliza un adaptador, como fuente de alimentación del módulo convertidor CC-CC elevador. La figura (36), muestra el sistema que suministra la energía al módulo.

Figura 36. Fuente de alimentación.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

Las características de la fuente se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 6. Características de la fuente.

Modelo	HX08-1205(608)
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
Voltaje de entrada	100 - 240 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Voltaje de salida	12 [V]
Corriente salida	5 [A]

Fuente: [Autores].

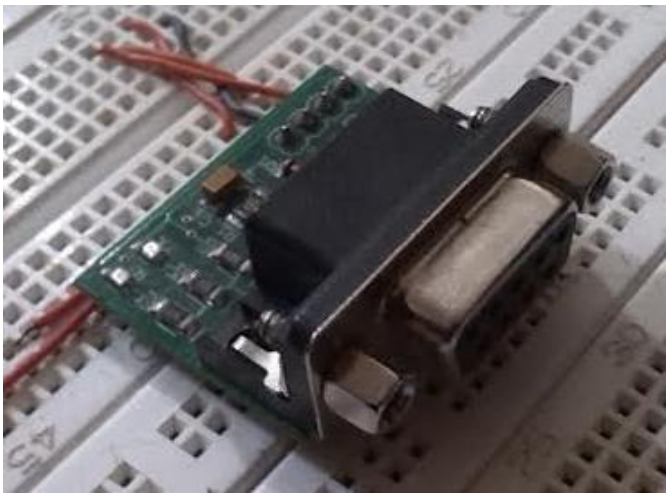
4.1.4 Arduino utilizado.

El arduino que se utilizó para la construcción de la placa del circuito, fue el *arduino pro-mini Atmega328*, se decide por utilizar esta plataforma debido a que sus dimensiones son muy pequeñas y además es de fácil implementación.

Para grabar el código de programación se utiliza una tarjeta que convierte niveles de RS-232 a TTL (UART), y un cable adaptador USB a serial RS-232.

La siguiente figura muestra la tarjeta RS-232.

Figura 37. Tarjeta RS-232.



Fuente: [Fotografías]. [Autores].

El adaptador USB a serial RS-232, viene con un driver de instalación para que el computador acepte el envió de datos por este medio de comunicación y el software de la plataforma acceda al puerto. En la figura (38), se puede ver el cable de conexión.

Figura 38. Adaptador USB a serial RS-232.

Fuente: [Fotografía]. [Autores].

La conexión del arduino para grabar el código se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 39. Conexión para quemar el arduino.

Fuente: [Autores].

El algoritmo del sistema de control del convertidor CC-CC elevador, se encuentra en el Anexo B. [Ver anexo B].

4.2 PRESUPUESTO

Para el presupuesto del proyecto, se dividió en tres segmentos: Costo de materiales, costo de trabajo, costo total. Este estudio financiero es válido hasta el 29 de mayo de 2015, ya que los precios de los elementos varían durante el año.

4.2.1 Costo de materiales.

En la siguiente tabla se puede ver el estudio de costo a los materiales comprados para la realización del proyecto.

Tabla 7. Costos de materiales.

DESCRIPCIÓN	Precio Unitario ($)	Cantidad	Subtotal ($)
PCB Convertidor			
Inductor 9.8 mH - 4 Amperes	$ 50,000	1	$ 50,000
Diodo MUR-480	$ 2,500	3	$ 7,500
Capacitor 220 uF - 50 Volts	$ 350	2	$ 700
Transistor IRF-830	$ 2,500	2	$ 5,000
Disipador	$ 1,000	2	$ 2,000
Aislante	$ 400	2	$ 800
Resistencia 1.8 KΩ	$ 100	2	$ 200
Resistencia 470 Ω	$ 100	2	$ 200
Resistencia 220 Ω	$ 100	2	$ 200

Resistencia 3.3 KΩ	$	100	2	$ 200
Resistencia 1.5 KΩ	$	100	2	$ 200
Resistencia 5.3 Ω	$	100	2	$ 200
Resistencia 180 Ω	$	100	2	$ 200
Resistencia 120 Ω	$	100	2	$ 200
Resistencia 1 KΩ	$	100	2	$ 200
LM358	$	700	2	$ 1,400
Led verde 5 mm	$	200	1	$ 200
Interruptor (encendido)	$	1,000	1	$ 1,000
Interruptor 2 posiciones	$	500	1	$ 500
Conector caimán rojo	$	500	2	$ 1,000
Plug conector banana (rojo)	$	500	20	$ 10,000
Plug conector banana (negro)	$	500	10	$ 5,000
Conector banana hembra(rojo)	$	400	29	$ 11,600
Conector banana hembra (negro)	$	400	13	$ 5,200
Cable calibre 18 (rojo)	$	500	9	$ 4,500
Cable calibre 18 (negro)	$	500	4	$ 2,000
Cable polarizado	$	1,000	1	$ 1,000
Jack 8 mm	$	800	2	$ 1,600
Espadines (Hembra)	$	500	2	$ 1,000
Base para integrado de 8 pines	$	700	1	$ 700
Espadines (Macho)	$	500	2	$ 1,000
Borna conexión	$	600	2	$ 1,200
Arduino Pro-Mini	$	22,700	1	$ 22,700
Baquela (30x30 cm)	$	25,000	1	$ 25,000
Otros componentes				
Fuente de 12 Volts - 5 Amperes	$	36,000	1	$ 36,000
Multímetro digital Próskit	$	74,600	1	$ 74,600
Caja para conexiones eléctricas	$	66,000	1	$ 66,000
Propalcote	$	1,000	1	$ 1,000
Impresión láser circuito	$	600	6	$ 3,600
Adhesivo para la tapa	$	20,000	1	$ 20,000
Sharpie	$	2,500	1	$ 2,500
Percloruro Férrico	$	2,000	2	$ 4,000
Alcohol Isopropílico	$	4,000	1	$ 4,000
Broca 1/32	$	3,000	2	$ 6,000
Broca 1/16	$	1,700	2	$ 3,400
Tornillo M3	$	50	3	$ 150
Tuerca M3	$	50	3	$ 150
Tornillo M2 (goloso)	$	20.00	10	$ 200
Total				$ 386,000

Fuente: [Autores].

4.2.2 Costo de trabajo

Se estimaron los costos de trabajo por hora, que llevo el proyecto.

Tabla 8. Costos de trabajo.

ACTIVIDAD	COSTO HORA ($)	NÚMERO HORAS	COSTO($)
Diseño adhesivo	$ 10,000.00	2	$ 20,000.00
Diseño convertidor	$ 15,000.00	40	$ 600,000.00
Implementación física	$ 15,000.00	20	$ 300,000.00
Total			$ 920,000.00

Fuente: [Autores].

4.2.3 Costo total

Se realiza la suma de los costos de materiales y de trabajo para obtener el presupuesto final del proyecto.

Tabla 9. Presupuesto final.

TIPO	COSTO
Costos personales	$ 920,000.00
Costos materiales	$ 386,000.00
Total	$ 1,306,000.00

Fuente: [Autores].

4.3 RESULTADOS

Los desarrollos teóricos fueron verificados por medio de simulaciones y pruebas experimentales, todos basándose en el modo de conducción continua. Los resultados demuestran que la dinámica del sistema en lazo cerrado mejoró el funcionamiento del convertidor, donde se corrige el ciclo de trabajo para que su señal permanezca suave, sin cambios bruscos en el ancho de pulso.

Se analizó el error en estado estable, para verificar la calidad del controlador en el convertidor CC-CC elevador, frente a las cargas del sistema. La siguiente tabla tiene 10 muestras de cada referencia, para comprobar la variación del error y el valor del voltaje de salida.

Tabla 10. Muestras de la variación del error.

Referencia r[k]	Voltaje de salida [V]	Error de estado estable [V]
18 Volts	18.18	0.18
	18.21	0.21
	18.16	0.16
	18.17	0.17
	18.21	0.21
	18.19	0.19
	18.25	0.25
	18.22	0.22
	18.20	0.20
	18.19	0.19
24 Volts	24.21	0.21
	24.17	0.17
	24.15	0.15
	24.22	0.22
	24.21	0.21
	24.19	0.19
	24.15	0.15
	24.18	0.18
	24.19	0.19
	24.21	0.21
	24.21	0.21

Fuente: [Autores].

Al tener las muestras se procede a calcular el promedio de las mediciones de voltaje de salida con la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad Ecuación\ 4.1$$

Para la referencia de 18 volts el promedio de las medidas es:

$$\bar{X} = 18.20\ [V]$$

La desviación media de los valores medidos, del error en estado estable se encuentra con la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \qquad Ecuación\ 4.2$$

El resultado de la desviación es de $S = 0.03\ [V]$, entonces se calcula el valor aceptado para el controlador así:

$$Valor\ de\ salida\ del\ convertidor = \bar{X} \pm S \qquad Ecuación\ 4.3$$

La salida de voltaje del sistema que va a las cargas, para la referencia de 18 Volts, es de:

$$Valor\ de\ salida\ del\ convertidor = (18.20 \pm 0.03)\ [V] \qquad Ecuación\ 4.4$$

Ahora se procede a realizar el mismo análisis para la referencia de 24 Volts; primero se calcula el valor promedio de las mediciones con la ecuación (4.1), dando el resultado de $\bar{X} = 24.19\ [V]$.

Luego se calcula la desviación con la ecuación (4.2) dando como resultado $S = 0.02\ [V]$, para llegar al valor estimado de las mediciones con la ecuación (4.3) así:

$$Valor\ de\ salida\ del\ convertidor = (24.19 \pm 0.02)\ [V] \qquad Ecuación\ 4.5$$

Las ecuaciones (4.4) y (4.5), indican la dispersión que puede llegar a tomar el valor del voltaje de salida del módulo convertidor CC-CC elevador.

CONCLUSIONES

- El cálculo del modelo dinámico que se desarrolló para el proyecto del convertidor elevador, cumple con el objetivo del proceso matemático, ya que los análisis desarrollados por software demostraron que el sistema quedó apropiadamente linealizado por la aproximación de la expansión por series de Taylor. Se puede concluir, que al examinar las simulaciones de las funciones de transferencia que se hallaron a partir de las ecuaciones diferenciales; al realizar el diagrama de bloques en *Simulink*, este esquema en lazo cerrado provee una gráfica que muestra un correcto funcionamiento del controlador sintonizado con la ayuda de *MATLAB*, determinando que el modelo en pequeña señal del convertidor, permite inspeccionar el comportamiento del circuito de una manera muy general, pero sin perder la naturaleza del conversor CC-CC.

- El estudio que se efectuó sobre los inductores, dio resultados muy positivos, debido a que se pudo observar los distintos comportamientos que toma el convertidor elevador. Se puede concluir así:

    - Sobre el inductor 1, se pudo observar el comportamiento en modo de conducción continuo y sobre esta forma se trató el sistema durante todo el proyecto, puesto que este estado de conducción del circuito, nos permite una mejor estabilidad en estado estacionario, para el tipo de carga que se utilizó durante el diseño y la construcción del módulo.

    - A pesar de que el inductor 2, genera una resonancia sobre los motores, produciendo ruido en la señal de salida que va a las cargas del circuito, se dice que se obtuvieron resultados positivos, gracias a que se generó un modo de conducción discontinuo que no se tenía presente para la construcción del módulo, pero que fue de gran ayuda para mejorar la investigación. Al ver la gráfica obtenida para la corriente de la bobina, se llega a la conclusión que con este componente el convertidor puede pasar el límite entre la conducción discontinua y la continua, solo si se aumenta por lo menos 3 veces la frecuencia del PWM.

- Al realizar la simulación con el software *OrCAD Capture*, se concluyó que las consideraciones requeridas para la selección de los componentes adecuados del sistema, se logró simular con referencias de componentes que se consiguen en el mercado local, para aproximar el estudio a lo que se percibe en la vida real al implementar el convertidor CC-CC elevador.

- MATLAB®, ofrece herramientas eficaces al momento de sintonizar las constantes de control apropiadas para el sistema. Gracias a este software se desarrolló el controlador, el cual tiene un comportamiento adecuado, cuando se somete a una perturbación instantánea, incluso ante un aumento súbito de corriente, estabilizando el sistema ágilmente.

- Al momento de realizar la construcción del módulo, es de importancia realizar una lista de los componentes a conseguir. Es importante hacer cotizaciones de los implementos que se van a comprar en más de un local comercial, ya que esto le brinda al comprador un conocimiento de los elementos que puede obtener en el comercio. Además puede adquirir productos y soluciones que generarán un ahorro en tiempo y recursos, haciendo de la construcción un proceso dinámico y económico.

RECOMENDACIONES

- Una de las formas de mejorar el sistema es agregar elementos adicionales al modelo matemático. También mejorar y adaptar un sistema de control robusto que elimine con más efectividad el error de seguimiento en estado estacionario, y corrija los efectos de las perturbaciones de una forma más rápida. Al optimizar el algoritmo de control, se puede desarrollar un análisis de estabilidad exhaustivo para mejorar el diseño del convertidor.

- Siempre dentro de un proyecto se desea una mejora continua de la investigación, por este motivo se recomienda construir más módulos de electrónica de potencia, para que se pueda llegar a formar un entrenador completo, que permita a los estudiantes elaborar más prácticas en el laboratorio y ayudar al desarrollo de tecnologías en esta área tan amplia.

- Al concluir este trabajo, se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con los convertidores CC-CC, para extender los estudios expuestos en este trabajo. Ya que estos sistemas tienen otros tipos de configuración, se recomienda analizar la variación de estos circuitos para profundizar en alternativas que mejoren y complementen el conocimiento en los temas de electrónica de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V datasheet. [En línea]. [Citado 17-nov-2014]. Disponible en: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf>

[2] BACHA, Seddik, *et al*. *Power Electronic Converters Modeling and Control*. 1 ed. London: Springer, 2014. 469 p. ISBN 978-1-4471-5478-5.

[3] CAMPUZANO, Joaquín, *et al*. *Modelo de simulación con pérdidas y estrategia de control PID para el convertidor buck*. En: Revista Colombiana de tecnologías de avanzada. Octubre, 2013. Vol. 2, no 22, p. 1-8.

[4] ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. *Fundamentals of power electronics*. 2 ed. Springer, 2001. 883 p. ISBN 978-0-306-48048-5.

[5] GRIÑÓ, Robert; MALO, Shane. *Análisis y diseño de controladores lineales para el convertidor elevador ("boost") bidireccional en corriente*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, 2005. 61 p.

[6] HART, Daniel W. *Electrónica de Potencia*. 2 ed. Madrid: Prentice-Hall, 2001. 472 p. ISBN 84-205-3179-0.

[7] Ibíd., p. 203-210.

[8] Ibíd., p. 212-217.

[9] Ibíd., p. 219.

[10] MOHAN, Ned; UNDENLAN, Tore M. y ROBBINS, William P. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. 2 Ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 1995. p. 144.

[11] OGATA, Katsuhiko. INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA. 3 ed. Prentice-Hall, 2003. 965 p. ISBN 970-17-0048-1.

[12] RASHID, Muhammad H. *Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 3 ed. Pearson educación. p. 186. ISBN 970-26-0532-6.

[13] Ibíd., p. 192-194.

[14] RESTREPO, Carlos; TORRES, Carlos Andrés. *Consideraciones de diseño estático y dinámico para convertidores CC-CC*. En: Scientia et technica. Agosto, 2009, no. 42, p. 57-62.

[15] VALDERRAMA, Freddy F.; VEGA, Héctor M. *Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost*. En: INGENIUM. Julio-diciembre, 2011, no 24, p. 44-55.

ANEXOS

ANEXO A

HOJA DE DATOS OSCILOSCOPIO

TechnicalData	DQ6025	DQ6052	DQ6052E	DQ6102E
Display				
Type	7" rectangle color LCD			
Backlight intensity	300cd/m^2			
Display resolution	400 horizontal × 240 vertical pixels			
Display contrast	Adjustable			
VERTICAL SYSTEM				
Sensitivity and accuracy	1mV / DIV~20V / DIV			
Vertical resolution	8 bit			
Width of band (-3dB)	25MHz	50MHz	50MHz	100MHz
Rise time	≤14ns	≤7ns	≤7ns	≤3.5ns
Sing-shot band width	25MHz	50MHz	50MHz	100MHz
Input coupling	DC , GND , AC			
DC gain accuracy	±5% (1mV/DIV~2mV/DIV), ±4% (5mV/DIV) ±3% (10mV/DIV~20mV/DIV)			
Delta voltage Measurement accuracy	±(3%Rdg+0.05DIV)			
HORIZONTAL SYSTEM				
SEC/DIV range	10ns~50s/DIV	5ns~50s/DIV	2ns~50s/DIV	2ns~50s/DIV
Sampling rate range	500M Sa/s	500M Sa/s	1G Sa/s	1G Sa/s
Wave form interpolation	(Sinx)/x			
Record length	2 x 512k/channel			
Memory length	25k (12.5k per channel)			
Sampling rate and delay Time accuracy	±100ppm over any ≥1mS time interval			
Delta time Measurement accuracy	Single ± (1 sampling interval time+ 100ppm x rdg +0.6ns) Average ± (1 sampling interval time+ 50ppm x rdg +0.4ns)			
TRIGGER SYSTEM				
Acquisition Mode	AUTO, Normal, Single			
Type	Edge,TV, pulse, Width			
Hold Off Range	80ns~1.5s			
MATH	+, −, ×, ÷			
	FFT			
ACQUIRE INPUT				
Input couping	DC、AC or GND			
Input impedance	1MΩ±2% 20pF±3pF			
Probe attenuation	1x、10x、100x、1000x			
Max.input voltage	400V (DC + AC peak) at 1KHz or less			

Channel CMR	Better than 40:1
Channel isolation	Better than 40:1
DISPLAY	
Persist time	1s, 2s, 5s
STORAGE	Waveform, Setup, Bit
RECORDER	Record, Replay
MEASUREMENT	
Cursor	Voltage difference△(V) between cursors
	Time difference(△T) between cursors
	Reciprocal of △T in Hz (1/△T)
AUTO-Mesure	Vrms, Vavg, Vp-p, Vmax, Vmin, Vtop, Vhigh, Vlow, Vmid, Vamp; period, Freq, Rise, Fall, +Width, +Duty, -Duty, Delay
I/O	
Standard	USB OTG
CALIBRATOR SIGNAL	
Output Voltage	3V (≥1MΩ load)
Output Frequency	1 kHz
POWER SOURCE	100/240VACrms, 45Hz~440Hz, 50VaMax; CAT II
ACCESSORIES	One operation manual,Power cord, USB cable, probe2, Software CD-ROM
DIMENSIONS & WEIGHT	306(W) x 147(H) x 122(D)mm, 2.2kg

ANEXO B

ALGORITMO DEL CONTROLADOR

```
/*
Sistema de control PI: La ecuación en diferencia del controlador PI, modifica la entrada del sistema u[k] que hace referencia al duty cycle del convertidor CC-CC elevador...

 */
int saturacion;
int v1=0;
int v2=0;
int estado=2;
int estado2=3;
int sensorpin=A0;
float sensorvalor=0;
float  uk=50;
double uk1=0;
double ek =0.0;
double ek1 =0.0;
int duty=0;
float constante=8.5;
float rk=3.7485; // equivale a 24 V a rk=4.948 para motor 24... para motor de 18=3.75
double C1=0.241317116627406;
double C2=0.00286855645401587;
float valor=0.0;

int pinLed = 9;        // Seleccionamos pin para el Led...pin12 mega timer 1%%timer 1 leonardo pines 9-10-11... pines 4 para timer0
//int valorSensor = 0;   // variable para el valor del sensor.

void setup() {
  pinMode(pinLed, OUTPUT); // Establecemos el pin como salida.
  pinMode(estado, INPUT);
  pinMode(estado2, INPUT);
// Serial.begin(9600);
    TCCR1B = 0x81; //  direccion del timer...seleccion del contador. timer0=0x44... timer1=0x81 ... estan en canal B
    TCCR1B = 0x01; // prescaler = 1.
    OCR1A = 255;   // tope de la señal o maximo pwm 0-255
    TIMSK1=0;      //deshabilita cualquier interrupcion que
                   //pueda haber para evitar posibles conflictos.

   }
void loop() {

    sensorvalor= analogRead(sensorpin);
```

```
   v1=digitalRead(estado);
   delay(20);
   v2=digitalRead(estado2);
   delay(20);
  float valor = sensorvalor * (5.0 / 1023.0);

  if (v1==1 && v2==0){
   rk=4.9775;
   constante=8.5;
   saturacion=160;
  }
  if (v2==1 && v1==0) {
   rk=3.7480;
   constante=10.394;
   saturacion=120;
  }
  ////////////////////////////////
  //controlador PI
  ek= rk - valor;
  uk= C1*ek + C2*ek1 +uk1; //Ecuación en diferencias del controlador PI
  uk1=uk; // Estados anteriores
  ek1=ek;

  duty= uk*255/constante; //8.5 para motor 24V...10.394 para motor 18V
 //Saturación de la señal del duty para proteccion del sistema y evitar que se
desestabiice la entrada
 if (duty >= saturacion){
   duty=saturacion;
  }

  // Establecemos el valor analógico para la salida PWM
  analogWrite(pinLed,duty);  //duty para planta real funciona en 157=24V...  para
motor real 92=18V
  //frecuencia generada 31.38 kHz
   delay(700);

}
//Motor de planta duty en osciloscopio de: 45% para un valor de "145" con una
salida de voltaje de 24 V.
```

ANEXO C

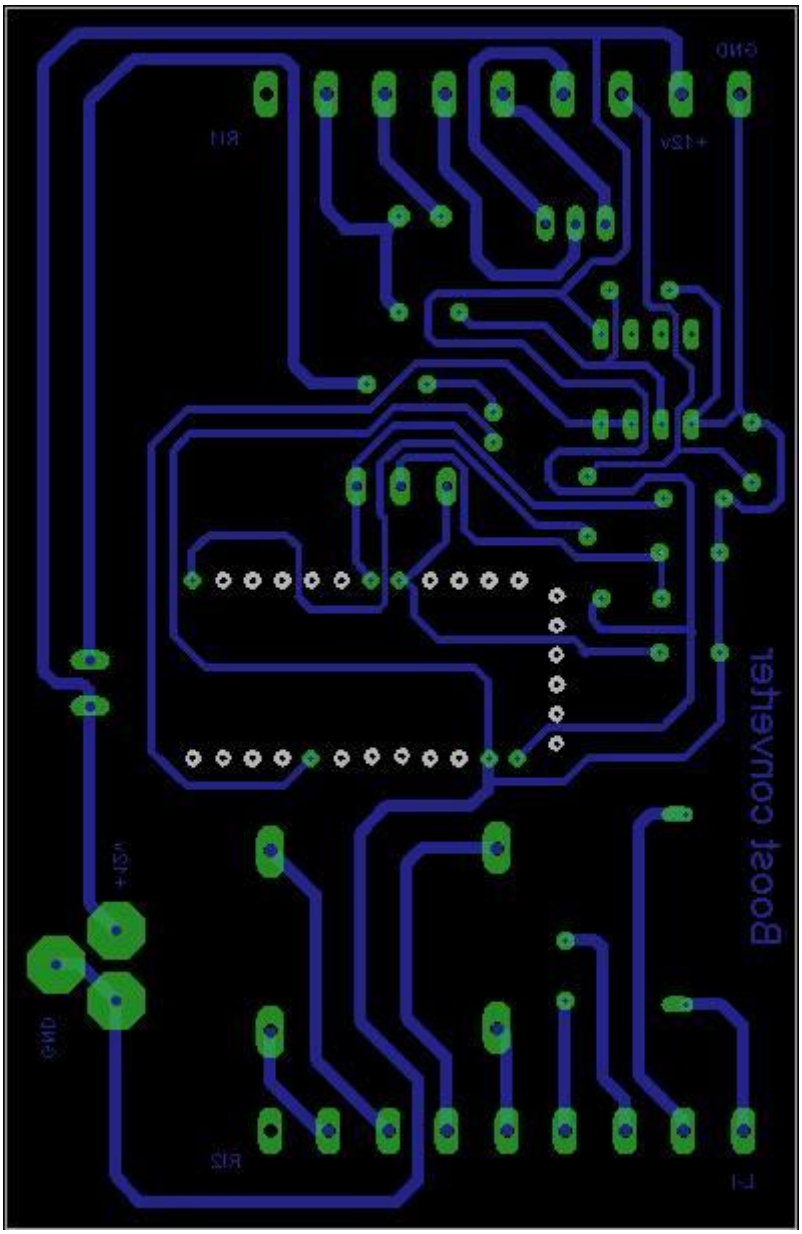
HOJA DE DATOS MULTÍMETRO

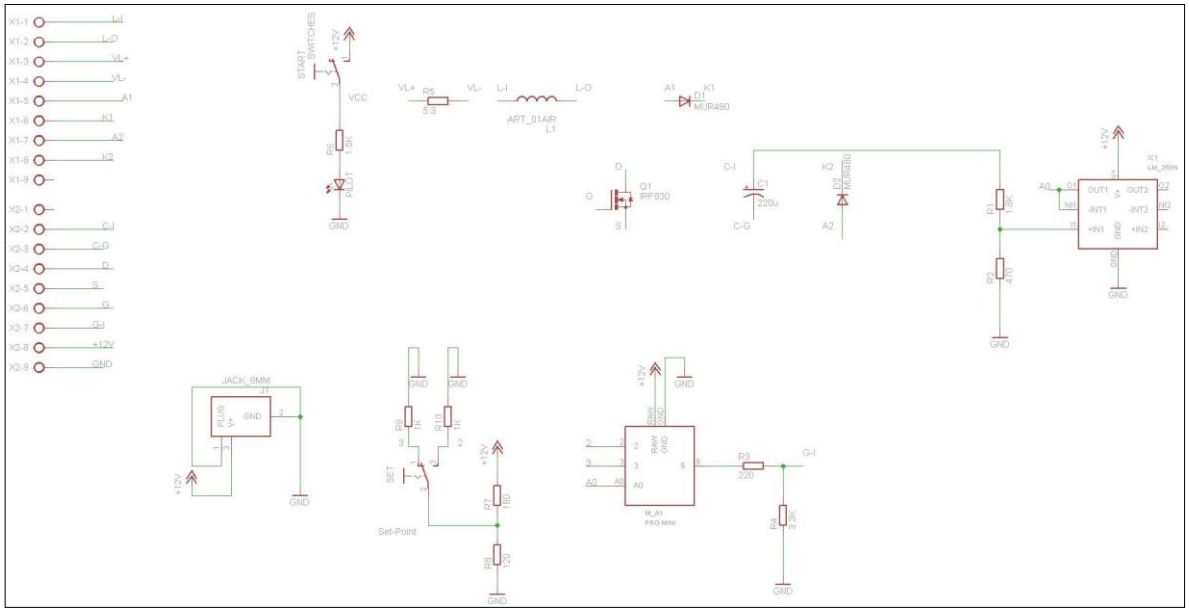
Counter	3999
Digits	3 3/4
Panel size	57×33mm, 18.9mm high figure
Backlight	N
Analog bargraph	N
Auto/Manual ranging	Both
DC (V)	400mV/4V/40V/400V ±(0.5%+4d)
	600V ±(1.0%+4d)
AC(V)	4V/40V/400V ±(0.8%+6d)
	600V ±(1.0%+6d)
DC(A)	400µA/4000µA ±(1.0%+10d)
	40mA/400mA ±(1.0%+10d)
	10A ±(1.2%+10d)
AC(A)	400µA/4000µA ±(1.5%+10d)
	40mA/400mA ±(1.5%+10d)
	10A ±(2.5%+15d)
Resistance(Ω)	400Ω ±(0.8%+5d)
	4/40/400K/4MΩ ±(0.8%+4d)
	40MΩ ±(1.2%+10d)
Frequency(Hz)	1/10/100Hz ±(0.5%+10d)
	1K/10K/100KHz ±(0.5%+10d)
	1/10MHz ±(0.5%+10d)
Capacitance(µF)	4nF ±(0.5%+90d)
	40nF/400nF/4µF/40µF ±(3.5%+8d)
	100µF ±(5.0%+8d)
Temperature(C)	(-20C~1000C) < 400C±(1.0+5d)
	(-20C~1000C) >= 400C±(1.5+15d)
Continuity with beeper	Y

Diode test	Y
Transistor test	N
Display hold	Y
USB/RS232 interface	N
Automatic power off	Y
Low battery indication	Y
EN61010-1 CAT II /CAT III	600V
Bettery	1.5V AAA×2

ANEXO D

CIRCUITO IMPRESO




X1-1
X1-2
X1-3
X1-4
X1-5
X1-6
X1-7
X1-8
X1-9
X2-1
X2-2
X2-3
X2-4
X2-5
X2-6
X2-7
X2-8
X2-9
L-I
L-O
VL+
VL-
A1
K1
A2
K2
C-I
C-O
D
S
G
G-I
+12V
GND
START SWITCHES
VCC
R6
5.3
ART_01AIR
L1
D1
MUR480
Q1
IRF830
C1
220u
C-G
D2
MBR480
A2
R1
1.5K
R2
470
IC1
LM_358N
OUT1
OUT2
-INT1
-INT2
+IN1
+IN2
JACK_9MM
PLUG
SET
Set-Point
R5
1K
R10
1K
R7
100
R8
120
M_A1
PRO-MINI
RAW
R3
220
R4
2.2K

ANEXO E

INSTRUCTIVO DEL MÓDULO

INSTRUCTIVO MÓDULO CONVERTIDOR CC.CC ELEVADOR

2015

Autores: Sebastian Cardona Herrera
Steven Ospina Hurtado

INSTRUCTIVO MÓDULO CONVERTIDOR CC.CC ELEVADOR

INGENIERÍA MECATRÓNICA

SEBASTIAN CARDONA HERRERA
STEVEN OSPINA HURTADO

Universidad Tecnológica de Pereira

Contenido

INTRODUCCIÓN 3
DESCRIPCIÓN COMPONENTES 4
1. **Convertidor CC-CC elevador** 4
2. **Fuente de alimentación** 4
3. **Módulo de instrumentación** 5
4. **Cargas del módulo** 6

INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN 7

INTRODUCCIÓN

La presente guía tiene como objetivo, brindar al lector la estructura de como se debe manejar el módulo convertidor CC-CC elevador. En el documento se presentan las herramientas que componen el entrenador, además de la configuración del dispositivo y puesta en marcha.

DESCRIPCIÓN COMPONENTES

El módulo convertidor CC-CC elevador, consta de los siguientes elementos:

1. Convertidor CC-CC elevador

La siguiente figura muestra el módulo del sistema.

Figura 1. Módulo convertidor.

Fuente: [Autores].

2. Fuente de alimentación

Las características de la fuente se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 1. Características de la fuente.

Modelo	HX08-1205(608)
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
Voltaje de entrada	100 - 240 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Voltaje de salida	12 [V]
Corriente salida	5 [A]

La fuente de alimentación se puede observar en la siguiente figura.

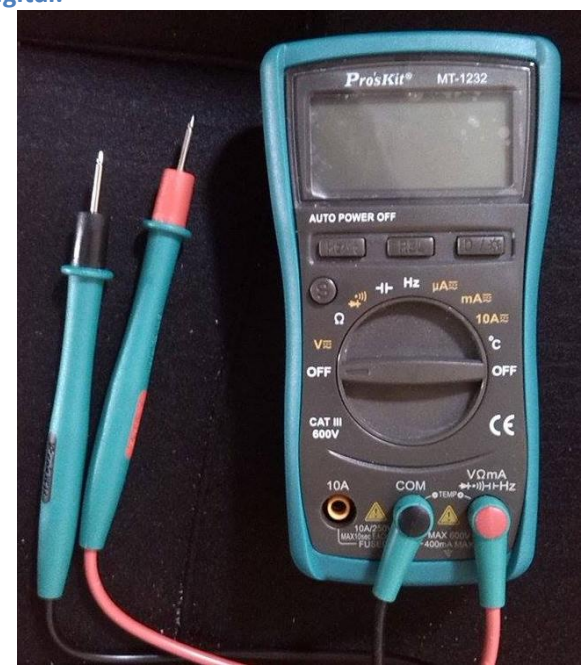
Figura 2. Fuente de alimentación del módulo.

Fuente: [Autores].

3. Módulo de instrumentación

Este módulo es un Multímetro digital de marca *PrósKit*, que se utiliza para la medición de la frecuencia, ciclo de trabajo y otras variables que se contemplan en el circuito del módulo. La siguiente figura muestra el instrumento.

Figura 3. Multímetro digital.

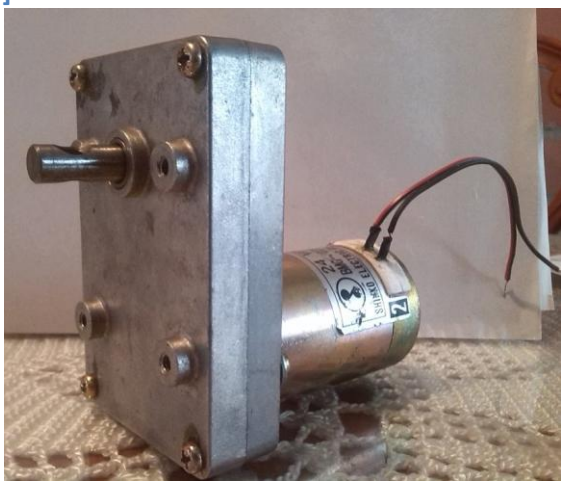


Fuente: [Autores].

4. Cargas del módulo

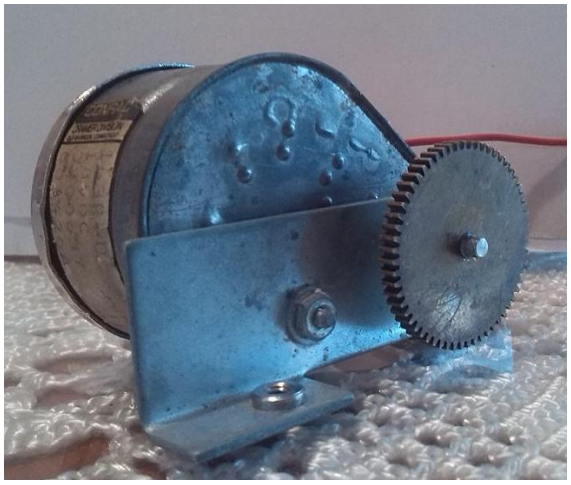
Para el módulo se contemplan dos cargas inductivas, que se pueden apreciar en las siguientes figuras.

Figura 4. Motor de 24 [V].



Fuente: [Autores].

Figura 5. Motor 18 [V].



Fuente: [Autores].

Tabla 2. Características de los motores.

Parámetros	Motor 18 [V]	Motor 24 [V]
Resistencia	132,7Ω	12,8 Ω
Inductancia	115,5mH	7,92mH
Capacitancia	-2,04 μF	-23,9 μF

INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

Para usar el módulo convertidor CC-CC elevador, se deben realizar los siguientes pasos:

- Conectar el módulo a la fuente de alimentación.
- Realizar las conexiones de cada uno de los elementos que conforman el entrenador.
- Establecer el valor de referencia del módulo.
- Encender el dispositivo.
- Realizar mediciones en la carga usando el módulo de instrumentación.

El módulo posee un interruptor de encendido y un Jack de alimentación, el cual se conecta la fuente de alimentación. La figura 6, muestra los elementos.

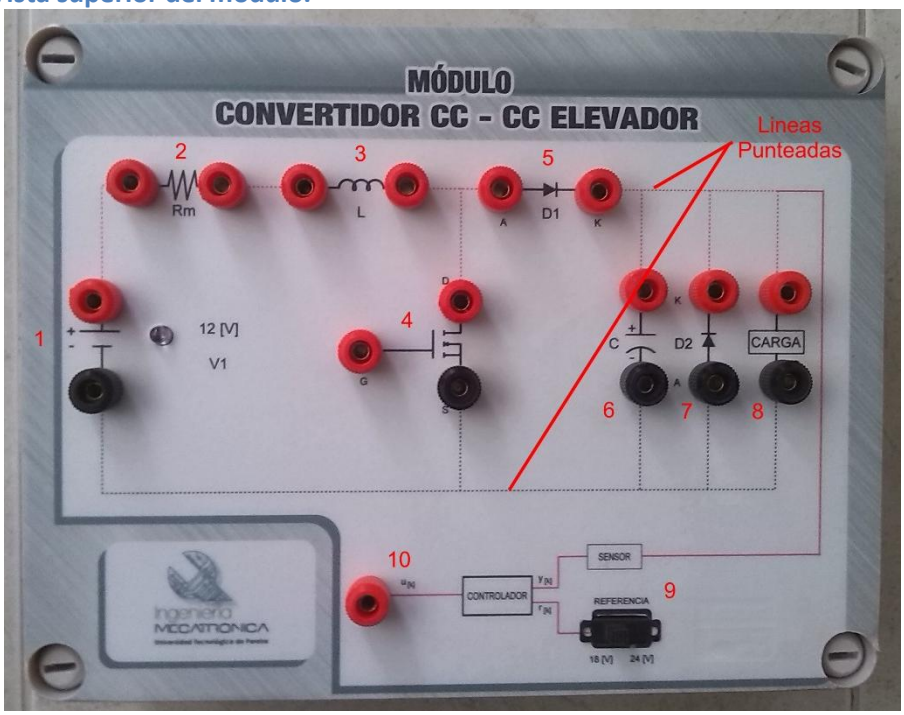
Figura 6. Vista lateral izquierda del módulo.

Fuente: [Autores].

Al momento de realizar la conexión entre componentes, se debe realizar el cableado tomando en cuenta las líneas punteadas en cada uno de los elementos, estas líneas tienen como finalidad, evitar errores de conexión de los dispositivos y guiar la ubicación de los componentes para un adecuado funcionamiento del circuito.

La siguiente figura, es una vista superior del convertidor.

Figura 7. Vista superior del módulo.



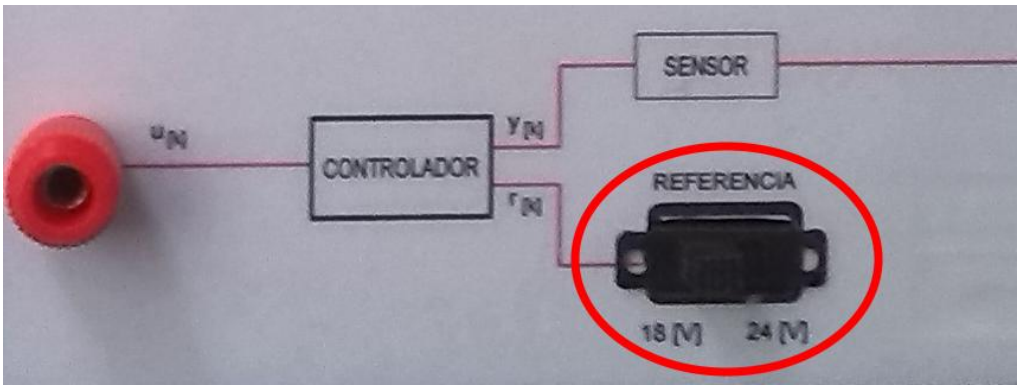
Fuente: [Autores].

El módulo consta de los siguientes componentes:

1. Fuente de alimentación.
2. Resistencia de medida del inductor (solo para medición de corriente de inductor, resistencia de shunt).
3. Inductor.
4. Transistor.
5. Diodo 1.
6. Capacitor.
7. Diodo 2 (usado para motores).
8. Carga inductiva (Motores).
9. Switche de referencia (set point).
10. Controlador.

Si se desea establecer un valor de set point distinto al establecido, se debe realizar cambiando el estado del switche de referencia.

Figura 8. Establecer referencia.



Fuente: [Autores].

Cuando se desee modificar de nuevo el valor de referencia, se aconseja apagar el entrenador y repetir los pasos de puesta marcha vistos anteriormente.